

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y
SISTEMAS DE TELECOMUNICACIONES



SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA UNA
APLICACIÓN DE DETECCIÓN DE RUIDO DE
REVERSA EN TIEMPO REAL

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

LEONARDO DÍAZ GÓMEZ

Tutor:

Dr. Mariano Ruiz González

Ingeniero Técnico de Telecomunicación, Especialidad
en Sistemas Electrónicos

SEPTIEMBRE DEL 2014

Tema y Título:

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA UNA APLICACIÓN DE DETECCIÓN DE RUIDO DE REVERSA EN TIEMPO REAL

Autor:

LEONARDO DÍAZ GÓMEZ

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO EN TELECOMUNICACIONES, ESPECIALIDAD EN SISTEMAS ELECTRÓNICOS

Tutor:

MARIANO RUIZ GONZÁLEZ

Departamento:

SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE CONTROL

TRIBUNAL

Director:

CÉSAR ASECIO RIVERA

Presidente:

JESUS MORENO BLAZQUEZ

Vocal:

MARIANO RUIZ GÓNZALEZ

Vocal Secretario:

JUAN MANUEL LÓPEZ NAVARRO

Fecha de Lectura:

29 de Septiembre de 2014

*Cuando quieres
realmente una cosa,
El universo conspira para ayudarte
a conseguirla*

AGRADECIMIENTOS

Con estas últimas palabras esto cierro un grandioso capítulo de mi vida, a mi lado han caminado personas maravillosas a las que tengo mucho que agradecer.

Primero que todo y mas que agradecerle le dedico este gran logro a Elsa, mi madre, porque sin ella no sería la persona que soy, por su amor, su dedicación, su sacrificio y apoyo, el ejemplo de superación que ha representado en mi vida, no hubiese podido llegar hasta aquí.

A mi familia, aunque estén lejos, siempre me han brindado su cariño y su apoyo.

Un cordial agradecimiento Mariano y a César por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto, por su ayuda y paciencia.

Como la famosa frase “el que encuentra un amigo, encuentra un tesoro” esos personajes que durante todos estos años se han convertidos en mis hermanos “César y Paul”, mis compañeros de luchas y de historias.

A esos amigos que he encontrado en el camino y que nunca han dejado de mostrarme un cariño, viviendo grandes experiencias y que de alguna forma u otra siempre han estado allí.

Por último, gracias a Dios por las grandes oportunidades que me ha brindado al transcurrir de los años.

RESUMEN

Entre todas las fuentes de ruido, la activación de la propulsión en reversa de un avión después de aterrizar es conocida por las autoridades del aeropuerto como una causa importante de impacto acústico, molestias y quejas en las proximidades vecinas de los aeropuertos. Por ello, muchos de los aeropuertos de todo el mundo han establecido restricciones en el uso de la reversa, especialmente en las horas de la noche.

Una forma de reducir el impacto acústico en las actividades aeroportuarias es implementar herramientas eficaces para la detección de ruido en reversa en los aeropuertos.

Para este proyecto de fin de carrera, aplicando la metodología TREND (Thrust Reverser Noise Detection), se pretende desarrollar un sistema software capaz de determinar que una aeronave que aterrice en la pista active el frenado en reversa en tiempo real.

Para el diseño de la aplicación se plantea un modelo software, que se compone de dos módulos:

- El módulo de adquisición de señales acústicas, simula un sistema de captación for señales de audio. Éste módulo obtiene muestra de señales estéreo de ficheros de audio de formato “.WAV” o del sistema de captación, para acondicionar las muestras de audio y enviarlas al siguiente módulo. El sistema de captación (array de micrófonos), se encuentra situado en una localización cercana a la pista de aterrizaje.
- El módulo de procesado busca los eventos de detección aplicando la metodología TREND con las muestras acústicas que recibe del módulo de adquisición.

La metodología TREND describe la búsqueda de dos eventos sonoros llamados evento 1 (**EV1**) y evento 2 (**EV2**); el primero de ellos, es el evento que se activa cuando una aeronave aterriza discriminando otros eventos sonoros como despegues de aviones y otros sonidos de fondo, mientras que el segundo, se producirá después del evento 1, sólo cuando la aeronave utilice la reversa para frenar.

Para determinar la detección del evento 1, es necesario discriminar las señales ajenas al aterrizaje aplicando un filtrado en la señal capturada, después, se aplicará un detector de umbral del nivel de presión sonora y por último, se determina la procedencia de la fuente de sonido con respecto al sistema de captación.

En el caso de la detección del evento 2, está basada en la implementación de umbrales en la evolución temporal del nivel de potencia acústica aplicando el modelo de propagación inversa, con ayuda del cálculo de la estimación de la distancia en cada instante de tiempo mientras el avión recorre la pista de aterrizaje.

Con cada aterrizaje detectado se realiza una grabación que se archiva en una carpeta específica y todos los datos adquiridos, son registrados por la aplicación software en un fichero de texto.

ABSTRACT

Among all noise sources, the activation of reverse thrust to slow the aircraft after landing is considered as an important cause of noise pollution by the airport authorities, as well as complaints and annoyance in the airport's nearby locations. Therefore, many airports around the globe have restricted the use of reverse thrust, especially during the evening hours.

One way to reduce noise impact on airport activities is the implementation of effective tools that deal with reverse noise detection.

This Final Project aims to the development of a software system capable of detecting if an aircraft landing on the runway activates reverse thrust on real time, using the TREND (Thrust Reverser Noise Detection) methodology.

To design this application, a two modules model is proposed:

- The acoustic signals obtainment module, which simulates an audio waves based catchment system. This module obtains stereo signal samples from ".WAV" audio files or the catchment system in order to prepare these audio samples and send them to the next module. The catchment system (a microphone array) is located on a place near the landing runway.
- The processing module, which looks for detection events among the acoustic samples received from the other module, using the TREND methodology. The TREND methodology describes the search of two sounds events named event 1 (EV1) and event 2 (EV2). The first is the event activated by a landing plane, discriminating other sound events such as background noises or taking off planes; the second one will occur after event one only when the aircraft uses reverse to slow down.

To determine event 1 detection, signals outside the landing must be discriminated using a filter on the caught signal. A pressure level's threshold detector will be used on the signal afterwards. Finally, the origin of the sound source is determined regarding the catchment system.

The detection of event 2 is based on threshold implementations in the temporal evolution of the acoustic power's level by using the inverse propagation model and calculating the distance estimation at each time step while the plane goes on the landing runway.

A recording is made every time a landing is detected, which is stored in a folder. All acquired data are registered by the software application on a text file.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. RUIDO EN AEROPUERTOS	11
1.2. MONITORADO Y EVALUACIÓN DE RUIDO EN AEROPUERTOS	24
1.3. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	29
2. APLICACIÓN DISEÑADA EN LABVIEW IMPLEMENTANDO EL SISTEMA TREND	31
2.1. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA DETECCIÓN DE RUIDO DE REVERSA (TREND).....	33
2.2. MEDICIONES Y CAPTURA DE AUDIO	35
2.3. DESCRIPCION DE LA APLICACIÓN	38
2.3.1. MÓDULO DE ADQUISICIÓN	39
2.3.2. MÓDULO DE PROCESAMIENTO	43
2.3.2.1.EVENTO 1: PROCESO PARA LA DISCRIMINACIÓN Y DETECCIÓN DEL ATERRIZAJE	44
2.3.2.2 EVENTO 2: PROCESADO PARA LA DETECCIÓN DE LA ACTIVACION DE LA REVERSA EN UN ATERRIZAJE	51
2.3.2.2.1 INCONVENIENTES EN LA DETECCIÓN DEL EVENTO EV2	52
2.3.2.2.2 ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE POTENCIA ACÚSTICA USANDO EL MODELO DE PROPAGACIÓN INVERSO	55
2.3.2.2.3 DETECCIÓN DE T2 Y T3 CON EL ANÁLISIS DE LA PENDIENTE DEL NIVEL DE POTENCIA ACÚSTICA ESTIMADA.....	60
2.3.2.3 REGISTRO Y GRABACIÓN DE EVENTOS	65
2.3.3. INTERFAZ DE USUARIO DE LA APLICACIÓN	68
3. RESULTADOS OBTENIDOS	75
CONCLUSIONES.....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Relación entre el ruido y la salud</i>	12
<i>Figura 1. La contaminación acústica y sus consecuencias en la salud</i>	15
<i>Figura 3 Comparación de la carrera de aterrizaje con y sin reversa[6]</i>	20
<i>Figura 4 Motor con reversa de tipo caparazón[6]</i>	21
<i>Figura 5 Motor con reversa tipo Bucket[6]</i>	21
<i>Figura 6 Motor con reversa de aire frío del bypass del turbofan[6]</i>	22
<i>Figura 7 Tipos de reversa en motores a reacción[6]</i>	22
<i>Figura 8 Terminales de monitorado de ruido</i>	24
<i>Figura 9 Evolución temporal del nivel sonoro durante el paso de de un avión[7]</i>	25
<i>Figura 10 Integración realizada por el Nivel de exposición sonora[7]</i>	26
<i>Figura 11 forma de onda de un aterrizaje con reversa</i>	34
<i>Figura 12 Diagrama de bloques del sistema TREND[7]</i>	34
<i>Figura 13 Localización del monitor de ruido</i>	36
<i>Figura 14 Requisitos para la localización del sistema de captación</i>	37
<i>Figura 15 Diagrama de bloques de la aplicación del sistema de adquisición de datos simplificado.</i>	38
<i>Figura 16 Procedimiento para el acceso a SoundBlaster</i>	40
<i>Figura 17 Procedimiento para el acceso a un fichero “.WAV”</i>	41
<i>Figura 18 Algoritmo utilizado para el módulo de adquisición de la aplicación</i>	42
<i>Figura 19 Algoritmo simplificado del procesado de la señal de audio</i>	43
<i>Figura 20 Efecto del filtrado paso banda en alta frecuencia</i>	44
<i>Figura 21 Diagrama de bloques del detector de eventos EV1</i>	45
<i>Figura 22 Diagrama de detección del evento EV1</i>	46
<i>Figura 23 Filtrado y nivel de presión sonora</i>	46
<i>Figura 24 Proceso de detección de nivel de umbral para el Evento 1</i>	47
<i>Figura 25 Captación del sonido en un aterrizaje</i>	48
<i>Figura 26 Diferencia de los valores temporales entre un aterrizaje y un despegue</i>	49
<i>Figura 27 Detector de la procedencia del sonido para activar EV1</i>	50
<i>Figura 28 Diagrama de bloques del detector de eventos EV2</i>	52
<i>Figura 29 Forma de onda de la reversa en diferentes casos[7]</i>	52
<i>Figura 30 Detección de evento EV1[7]</i>	53

<i>Figura 31 Diagrama de bloques de los tiempos de la metodología TREND[7]</i>	54
<i>Figura 32 Efecto producido por la utilización del nivel de potencia sonora (L_w) frente al nivel de presión sonora</i>	55
<i>Figura 33 Modelo simplificado para el cálculo de la distancia</i>	57
<i>Figura 34 diagrama de bloques del cálculo del nivel de potencia de sonido estimado</i>	58
<i>Figura 35 Proceso de detección de nivel de umbral para el Evento 2</i>	59
<i>Figura 36 Problemas asociado a la detección de EV2[7]</i>	60
<i>Figura 37 Restricciones aplicadas a la detección de EV2</i>	61
<i>Figura 38 Procesamiento para el cálculo de la pendiente temporal del nivel de potencia sonora</i> 62	
<i>Figura 39 Proceso para la detección de los instantes T2 y T3</i>	63
<i>Figura 40 Diagrama de Bloques de la Metodología TREND</i>	64
<i>Figura 41 Diagrama de bloques que describe el método de grabación y registro de la aplicación</i> 65	
<i>Figura 42 Diagrama de Bloques del módulo de grabación de eventos en pistas de audio</i>	67
<i>Figura 43. Panel frontal de la interfaz de usuario</i>	68
<i>Figura 44 Imagen de las señales principales en la detección de los eventos</i>	70
<i>Figura 45 Imagen de las formas de onda que interfieren en la detección de EV1</i>	71
<i>Figura 46 Imagen de las formas de onda que interfieren en la detección de EV2</i>	72
<i>Figura 47 Imagen de la evolución temporal de la distancia del avión al sensor</i>	73
<i>Figura 48 Imagen de reporte de los aterrizajes</i>	74
<i>Figura 49 Indicador de parámetros en la interfaz de control para la configuración de la aplicación</i>	77

1. INTRODUCCIÓN

1.1. RUIDO EN AEROPUERTOS

Cualquier actividad humana conlleva casi siempre un nivel de sonido más o menos elevado. Según el tipo, duración, lugar y momento en el que se produce, el sonido puede resultar molesto, incómodo e incluso alterar el bienestar de los seres vivos. En ese caso, se denomina ruido y es considerado como contaminación. [1]

Contaminación acústica se define como la presencia en el ambiente de ruidos o vibraciones, cualquiera que sea el emisor acústico que los origine, que impliquen molestia, riesgo o daño para las personas, para el desarrollo de sus actividades o para los bienes de cualquier naturaleza, que causen efectos significativos sobre el medio ambiente (*Según la Ley del Ruido 37/2003, de 17 de noviembre*), causando a quien lo padece trastornos tanto físicos como psicológicos. En cuanto a los efectos adversos sobre la salud se suelen clasificar en efectos auditivos y efectos no auditivos.

Efectos auditivos: Los más conocidos son el trauma acústico, que se produce con ruidos impulsivos, de gran intensidad y corta duración (explosión) que pueden superar 140 dBA, pueden ocasionar una pérdida auditiva permanente en todas las frecuencias y la elevación temporal o permanente del umbral auditivo, que puede producirse con ruidos impulsivos de intensidad elevada y también con la exposición prolongada a ruidos de intensidad moderada o alta (más de 80 dBA).

Efectos no auditivos: El ruido es un estímulo que desde el nacimiento provoca reflejo de defensa y puede tener otros efectos perjudiciales en la salud de las personas a niveles muy inferiores a los de los efectos auditivos. En estos posibles efectos influyen, especialmente, además de los niveles, la relación subjetiva entre las personas receptoras y la fuente de ruido. [2]

Para dar un ejemplo se añade una tabla con los posibles efectos del ruido sobre la salud, los niveles a los que se pueden producir y las posibles fuentes. Hay que tener en cuenta que se trata de una aproximación al problema ya que cada persona reacciona de distinta manera a la exposición al ruido, especialmente en lo referente a los efectos no auditivos.

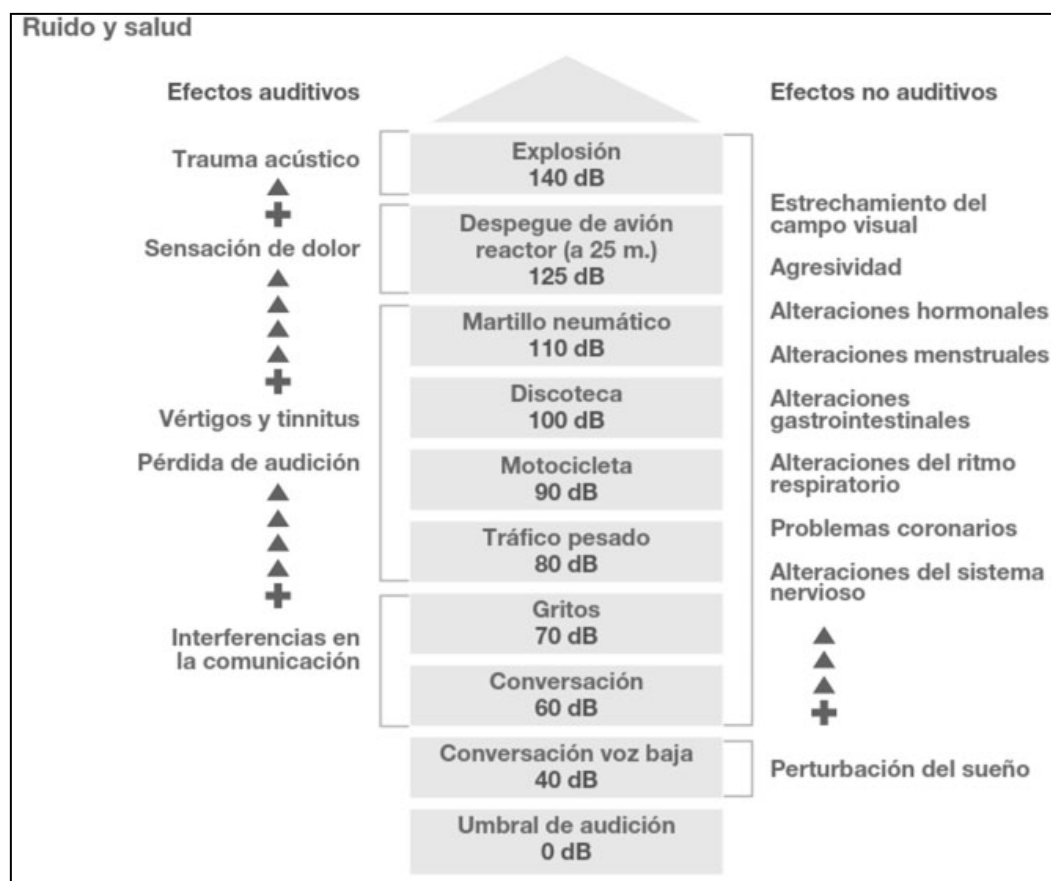


Figura 1. Relación entre el ruido y la salud [2]

El ruido además de los efectos perjudiciales para la salud, puede producir otros efectos adversos, tales como la pérdida de la privacidad y la depreciación de los inmuebles, especialmente los dedicados a vivienda.

La contaminación acústica, que es considerada por la población de las grandes ciudades como un factor medioambiental muy importante que afecta a su calidad de vida, también puede definirse como el incremento significativo de los niveles acústicos del medio. En realidad, esta contaminación ambiental urbana o ruido ambiental es una consecuencia directa no deseada de nuestras propias actividades en la gran ciudad, ya

que toda emisión sonora es una fuente contaminante potencial que puede generar problemas puntuales si no se toman las precauciones mínimas. [1]

Las principales causas de este problema debemos buscarlas en la propia actividad diaria, sobre todo en los grandes núcleos de población; el tráfico, las fábricas, los bares y discotecas, la construcción de edificios; generan niveles de ruido que sobrepasan, en ocasiones con creces, las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Según la OMS el límite considerado como adecuado es de 50 dB (decibelios), en España se considera contaminación acústica cuando se superan los 55 dB, en ambos casos nos referimos a horarios diurnos, ya que para la noche se recomienda que no se sobrepasen los 30 dB. Para que podamos hacernos una idea de lo que estamos hablando, los 50 dB se alcanzan en una conversación normal, una calle con mucho tráfico alcanzaría los 70 dB y por ejemplo en el interior de una discoteca se padecería hasta 110 dB. A partir de los 140 dB el oído humano comienza a sentir dolor. [3]

La Organización Mundial de la Salud (OMS), recogiendo esta problemática, ha establecido ciertos umbrales a partir de los cuales pueden surgir distintos efectos nocivos (Tabla 1). [4]

Tabla 1 Efectos nocivos de ruido y sus umbrales [4]

EFFECTOS NOCIVOS	Umbral dB
Pérdida de calidad y dificultad de conciliar el sueño	30
Dificultad de la comunicación verbal	40
Probable interrupción del sueño	45
Malestar diurno moderado	50
Malestar diurno fuerte	55
Comunicación verbal extremadamente difícil	65
Pérdida de oído a largo plazo	75
Pérdida de oído a corto plazo	110-140

Fuente: Organización Mundial de la Salud (1999).

En base a estos umbrales, la OMS ha elaborado sus recomendaciones para orientar a los entes e instituciones competentes sobre los límites máximos aceptables para la salud [4].

El transporte aéreo es un factor importante que genera problemas de contaminación acústica en el medio ambiente que lo rodea. Estos problemas se han venido incrementando en las últimas décadas, debido por un lado, a la aproximación de las ciudades a los aeropuertos y, por otro, al aumento del tráfico regular de pasajeros, mercancías y vuelos chárter, que operan de noche en muchas ocasiones. Existe, además, un problema añadido al no estar incluidos en la regulación los aviones militares, los helicópteros, ultraligeros y los aviones supersónicos ya sean civiles o militares.

Los aeropuertos actuales también son más ruidosos al estar dotados de variados servicios necesarios para las actividades de tráfico aéreo; estancia, reparación y suministro de aeronaves; recepción de viajeros y mercancías; estacionamiento de vehículos, etc. Del mismo modo, las compañías aéreas disponen, junto a los aeropuertos, de zonas industriales en las que realizan el mantenimiento de sus aviones, motores y componentes.

Las molestias ocasionadas a los habitantes de las ciudades cercanas a los aeropuertos se refieren fundamentalmente a la contaminación acústica, a los vertidos de hidrocarburos procedentes de las aeronaves y, en menor medida, a los riesgos de accidentes en zonas habitadas. Asimismo, también hay que decir que, junto a los impactos acústicos y atmosféricos, se producen otros impactos menos específicos y que tienen como resultado la generación de residuos, contaminación de aguas, consumo de energía, etc.



Figura 2. La contaminación acústica y sus consecuencias en la salud

En lo que se refiere a las competencias en este sector, el artículo 149.1.20º de la Constitución establece la competencia exclusiva del estado en materia de aeropuertos de interés general, control del espacio aéreo, tránsito y transporte aéreo, además de matriculación de aeronaves. Estas competencias las desarrolla a través del Ente Público Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea (**AENA**) que forma parte del Ministerio de Fomento y que fue constituido mediante el RD 905/1991. Este Ente público ejerce funciones en materia de navegación aérea y en materia de aeropuertos [5].

La adecuación entre la presión sonora generada por los aviones y los máximos sostenibles para la salud de los residentes es un problema complejo que debe solventarse equitativamente desde varios frentes de actuación. En esa línea hay que entender las medidas recomendadas por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y se clasifica en cuatro grupos: 1º, la renovación tecnológica que tiende a actuar sobre la fuente del ruido, es decir, en los aviones; 2º, la planificación y gestión territorial sensible a los conflictos que impida funciones incompatibles con la contaminación sonora; 3º el replanteamiento de los procedimientos operacionales; 4º, la imposición de restricciones en la explotación de la infraestructura.

- *Las medidas relativas a la renovación tecnológica de los aviones.* El comité para la protección ambiental de la OACI, responsable de la evaluación e implantación de los estándares y las recomendaciones necesarias para atenuar los impactos de la aviación en el medio ambiente, ha ido estableciendo límites de emisión sonora para las aeronaves cada vez más rigurosos. Estos límites se expresan en Efectivos de Ruido

Percibidos (EPNL) y actualmente se sitúan en un umbral que oscila entre 90 dB y 100 dB, estándares a los que se tienen que sujetar las nuevas aeronaves. Esta normativa supone que las aeronaves no pueden operar sin una conveniente adaptación (*OACI*).

En correspondencia a esta normativa, la industria aeronáutica ha evolucionado muy positivamente. Se han desarrollado nuevos motores que han permitido la reducción de hasta 20 dB respecto a los primeros reactores de la década de los 60. Además de otras tecnologías distintas al aislamiento acústico de los aviones más antiguos y ruidosos, se han desarrollado silenciadores capaces de reducir los impactos sonoros en unos cuantos decibelios. Esto ha dado pie a la adaptación de las aeronaves a la normativa vigente en la actualidad.

- *Medidas relacionadas con la planificación y gestión territorial.* La OACI ha introducido también, restricciones en los usos del suelo en los entornos aeroportuarios como medida para evitar al máximo las molestias de la contaminación acústica en la población. Por ello, la organización editó un manual de utilización del suelo para un correcto control del medio ambiente en el que se apuntan y recomiendan pautas para un planeamiento y gestión territorial compatibles con las funciones propias de la infraestructura aeroportuaria y las necesidades de la población local. Entre estas pautas nos parecen especialmente relevantes la zonificación de usos y el establecimiento de una metodología común para la confección de buenos mapas de ruidos que, al permitir diagnósticos afinados, contribuyan a una mejor gestión del problema.

En España estas medidas se reflejan en la nueva Ley de ruido. Esta ley abarca toda la problemática del ruido y el control de sus fuentes de emisión. En lo que se refiere concretamente al problema del tráfico aéreo viene a consagrar, entre otras figuras, la servidumbre acústica en los aeropuertos. Ello supone en la práctica una limitación clara de la expansión urbanística de las zonas afectadas por la proximidad aeroportuaria lo que va a limitar la autonomía municipal en la planificación urbanística puesto que los ayuntamientos se verán obligados a asumir la servidumbre y las áreas acústicas marcadas por el estado. Esta limitación vendrá regulada por la zonificación que delimitará los usos del suelo en función de la intensidad de la contaminación acústica. En caso de conflicto, se contemplan planes de insonorización de las viviendas o

equipamientos ya existentes cuando ello sea suficiente, así como la expropiación o prohibición de construcción en aquellos casos en los que el problema sea incontrolable con medidas paliativas.

- *Medidas aplicadas a los procedimientos operacionales.* Estas medidas constituyen un abanico de procedimientos para los servicios de la navegación aérea y las operaciones de los aviones que permitirán por sí mismos la disminución del ruido. Ello se consigue mediante la selección más adecuada de las rutas y altitud de vuelo, evitando al máximo posible su paso por zonas habitadas, pero muy especialmente en las maniobras de aproximación, aterrizaje y despegue que pueden ser realizadas de forma que el ruido no sólo sea menor sino que se distribuya más amplia y difusamente. Estas medidas, denominadas Procedimientos de Atenuación de ruidos, son recogidas en las Normas de Disciplina Aérea en Materia de Ruidos elaboradas en cada aeropuerto nacional en función de sus especificidades de localización geográfica y características estructurales de sus pistas. El incumplimiento de esta normativa puede ser causa de cuantiosas sanciones a las compañías aéreas.

- *Medidas restrictivas en la explotación de las infraestructuras.* Muchos aeropuertos han tomado ya medidas restrictivas respecto de las operaciones en determinados periodos especialmente problemáticos como es el nocturno, hasta otros que aplican restricciones parciales. Existen otras medidas de tipo económico, que consiste en realizar recargos o descuentos en las tasas aeroportuarias para compañías aéreas, en función del impacto acústico de los aviones. Así mismo se aplican recargos nocturnos en varios aeropuertos como es el caso de los aeropuertos alemanes. Los ingresos obtenidos son invertidos en programas de aislamiento acústico para las viviendas de las zonas más afectadas.

En las actividades que se desarrollan en el aeropuerto, las principales fuentes de emisión de ruido son las operaciones de aterrizaje y despegue. Los aterrizajes y despegues de las aeronaves más silenciosas suponen una presión sonora superior a 100 dB. Además, esta energía sonora se extiende a lo largo de corredores de varios kilómetros en la misma dirección de las pistas en las que se realizan las maniobras y lo hacen en función de

factores de tipo meteorológico (humedad relativa y el viento) que facilitan o dificultan su propagación [4].

A esto, se quiere enfocar este trabajo en las normas técnicas de utilización de aeronaves en los entornos aeroportuarios. Estas normas pretenden que el tráfico aéreo suponga una mínima perturbación a los vecinos del aeropuerto. Para que estas normas tengan éxito es imprescindible que se realice previamente un estudio acústico exhaustivo y con mediciones reales del entorno del aeropuerto, que abarque las trayectorias de las naves en las maniobras de despegue, aproximación y aterrizaje, así como el uso de los aviones una vez en tierra, incluyendo las operaciones en las áreas de aparcamiento de las aeronaves y las pruebas de motores. Todas estas operaciones las tienen que realizar el Ministerio de Fomento, a través de AENA, que es el órgano administrativo competente al efecto. Entre las medidas que deberán considerarse en este estudio podemos decir que las más eficaces para la resolución de este tipo de problemas son, entre otras, el establecimiento de las rutas de salida y llegada de modo que eviten sobrevolar a baja altitud las poblaciones más próximas al aeropuerto, restricciones a las operaciones nocturnas, restricciones a las pruebas de motores, prohibiendo su realización en régimen superior al ralentí¹ fuera de las horas y/o áreas designadas, restricciones al uso de APU's, prohibiendo el uso de la Unidad Auxiliar de Potencia (APU) del avión en determinadas posiciones de estacionamiento y estableciendo, en su caso, el suministro obligatorio de energía a 400 Hz a través de unidades móviles o fijas en pasarela, restricciones a los vuelos de entrenamiento, prohibiendo aquellas operaciones que sean de entrenamiento y restricciones al uso de Potencia Reversa, prohibiendo en aterrizajes el uso del empuje de reversa (frenado con el motor) por encima del régimen del ralentí, en determinadas pistas y/o franjas horarias salvo por razones de seguridad, entre otras.

Entre otras fuentes de ruido, la activación del empuje o propulsión en reversa es conocida por las autoridades aeroportuarias como una de las mayores fuentes de impacto acústico que molestan y aquejan en los alrededores del aeropuerto, que se utiliza para reducir la velocidad de la aeronave después del aterrizaje. En respuesta a ello, se ha creado una norma que se puede mencionar es el artículo tercero

¹ Número de revoluciones por minuto a las que debe funcionar un motor de explosión cuando no está acelerado

(Procedimientos de Atenuación Acústica) en la publicación realizada por “BOE núm. 187 de 07 de Agosto de 2006” en la circular aeronáutica 2/2006, de 26 de julio, de la Dirección General de Aviación Civil, por la que se establecen procedimientos de disciplina de tráfico aéreo en materia de ruido en el Aeropuerto de Madrid-Barajas:

- En el aterrizaje y salvo por razones de seguridad, queda así mismo prohibido el uso del empuje de reversa superior al ralentí durante el período nocturno que va desde las 23:00 a las 07:00 horas locales.[6]

Empuje inverso o empuje de reversa se conoce como la desviación temporal de la salida de un reactor de modo que los gases de escape sean expulsados en otra dirección distinta a la del avión. La desaceleración resultante actúa contra el avance de la aeronave, frenándola. Aunque los frenos de los aviones modernos son muy poderosos y eficientes, en una pista congelada, o muy mojada, esta efectividad se ve reducida por la pérdida de adherencia entre la goma y el asfalto, por lo que se hace necesario usar otro sistema adicional. Este sistema es empleado por muchos aviones de reacción para facilitar la frenada justo después de tocar tierra, reduciendo el esfuerzo de los frenos y permitiendo al avión operar en aeropuertos de pistas más cortas. También es instalado en aviones a hélice gracias a los motores con palas de inclinación variable hacia ángulos negativos, de modo que se puede invertir la dirección del flujo de aire.

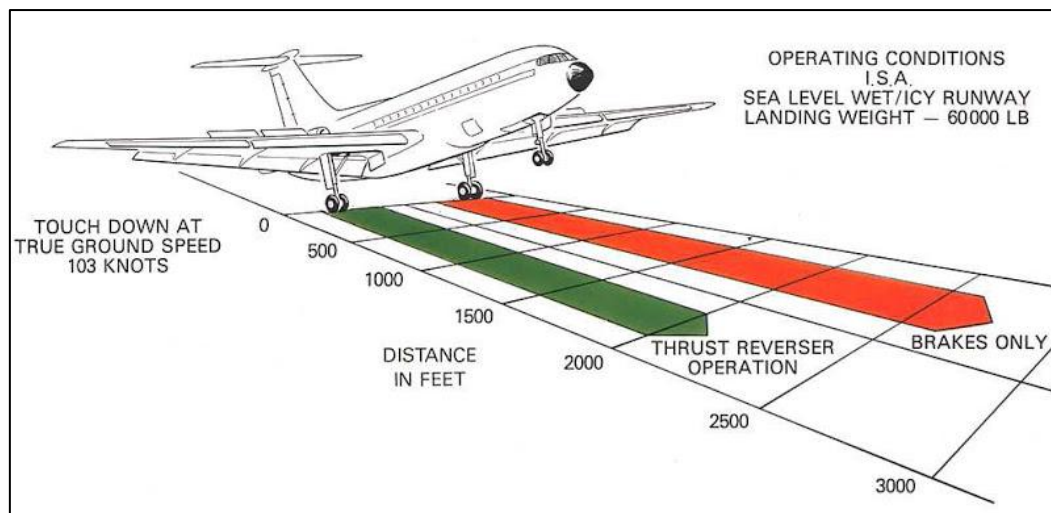


Figura 3 Comparación de la carrera de aterrizaje con y sin reversa [7]

En la imagen anterior vemos una comparativa de la carrera de aterrizaje con y sin reversa, en condiciones estándar de la ISA, sobre pista mojada o helada, con un peso al aterrizaje de 60000 libras “27215,540 Kg” y una velocidad de 103 Nudos “190.756 Km/h”. Como podemos ver, es una diferencia significativa, de unos 800 pies “243.84 metros”. [7]

El avión a reacción usa un método idóneo que consiste en revertir la dirección del chorro de gases. Un motor de reacción funciona acelerando un chorro de gases hacia atrás, con lo que el avión sale impulsado hacia delante (acción-reacción). Si el chorro de gases sale hacia delante, la fuerza de reacción va hacia atrás, frenando el avión.

Ahora bien, idealmente, el chorro de gases debería ir justo hacia delante, es decir, hacerlo girar 180° , ya que eso es imposible, en la realidad lo que se hace es girar 135° .

Existen varios tipos, dependiendo el motor, y básicamente es una cuestión de diseño. Pero el principio de funcionamiento siempre es el mismo.

Si el motor es de flujo único (el turboreactor), suele haber dos formas de hacerse:

- Por medio de unas compuertas que deriven el flujo antes de salir del motor tras atravesar la turbina, porque sino el motor se acabaría parando.

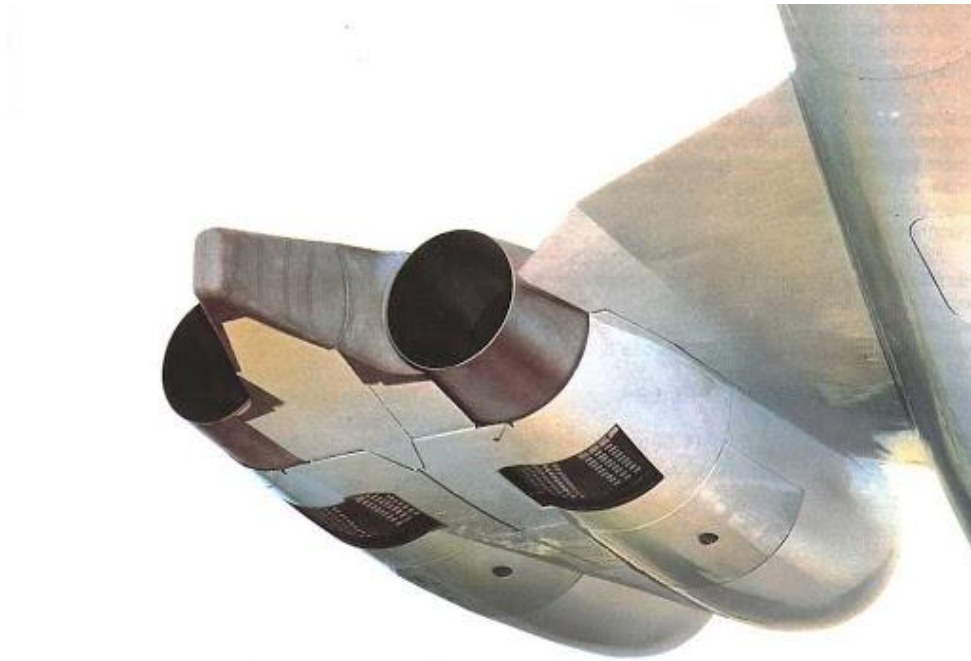


Figura 4 Motor con reversa de tipo caparazón [7]

- Por medio de una tobera abatible, cuyas partes superior e inferior pivotan hacia afuera para bloquear el flujo, y revertirlo, una vez fuera del motor.



Figura 5 Motor con reversa tipo Bucket [7]

Si el motor es de doble flujo (turbofan), se revierte la dirección del flujo secundario, que es el que no sufre las transformaciones termodinámicas del motor, es decir, el que va directamente del fan a la tobera, sin pasar por el compresor, cámara de combustión y turbina.

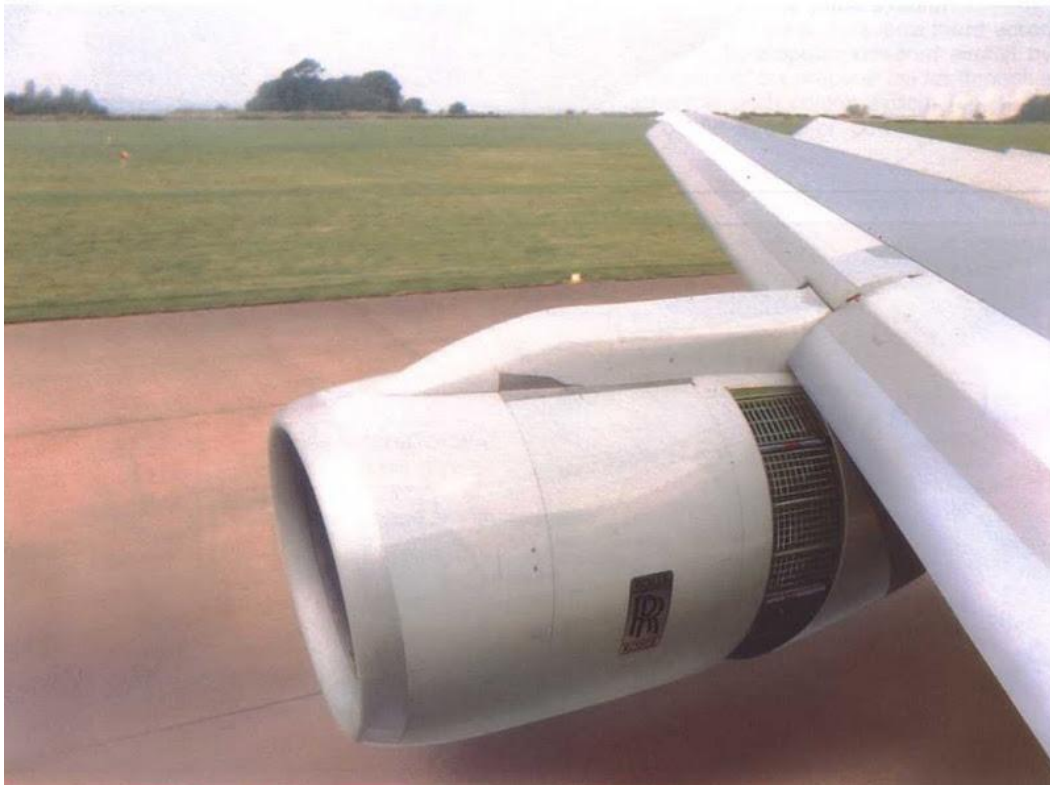


Figura 6 Motor con reversa de aire frío del bypass del turbofan [7]

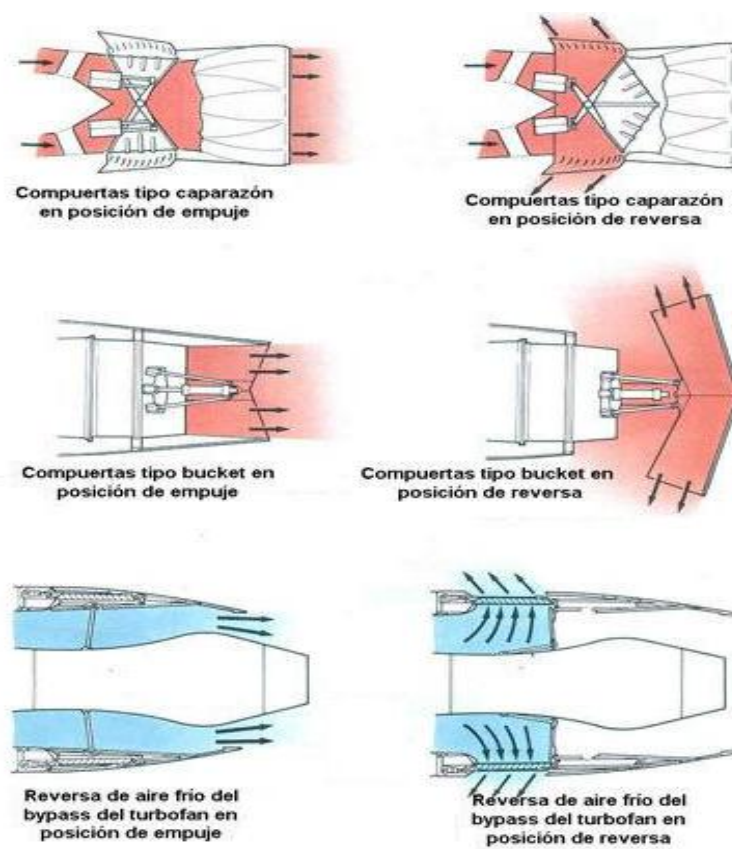


Figura 7 Tipos de reversa en motores a reacción [7]

Sin embargo, las normas dictan que un avión debe ser capaz de aterrizar en una pista sin el uso del sistema para que sea certificado como operativo en ella.

El uso del empuje inverso es fácilmente identificable por un repentino aumento del ruido de los motores justo antes de aterrizar. Los inversores son claramente visibles en la parte trasera de los motores durante su uso.

El uso de este sistema de frenado se utiliza generalmente en los momentos en los que la aeronave debe aterrizar en una pista demasiado corta para ello y la frenada tiene que producirse rápidamente.

En base a los problemas de contaminación acústica que causa específicamente el empuje en reversa y a falta de un sistema de monitorado que lo detecte eficazmente, en la tesis doctoral *“Aportaciones a los sistemas de discriminación de fuentes sonoras en la medida de ruido en aeropuertos”* [8] se describe una metodología capaz de realizar la detección del frenado en reversa en el momento de un aterrizaje. Este trabajo de fin de carrera utiliza los parámetros descritos allí para realizar esta detección que se explica más adelante en la descripción de la aplicación del proyecto.

En el siguiente apartado se ofrece una visión global de los problemas asociados a la medición de ruido provocado por los aviones y se describe el método usado para la evaluación del ruido en la proximidades de aeropuertos, extraído la tesis *“Aportaciones a los sistemas de discriminación de fuentes sonoras en la medida de ruido en aeropuertos”*[8].

1.2. MONITORADO Y EVALUACIÓN DE RUIDO EN AEROPUERTOS

Para la medición de ruido, se necesitan terminales de monitorado de ruido ambiental, utilizados fundamentalmente en aeropuertos. Estos realizan las mediciones de nivel de ruido ambiental para evaluar el nivel de contaminación generado por las aeronaves. Están compuestos por un micrófono, que capta una señal acústica y la convierte en señal eléctrica. El preamplificador acondiciona la señal y la inserta en el sistema de medida, que se encarga de obtener los indicadores adecuados. Debido a que estos sistemas se utilizan en exteriores, el micrófono debe contar con elementos de protección que lo capaciten para su uso en intemperie (protección contra lluvia, viento, pájaros, etc. Además, dichos monitores deben instalarse a una altura elevada del suelo, y lejos de otras superficies reflectantes minimizando la influencia de flexiones en la medida.



Figura 8 Terminales de monitorado de ruido

La medida de las señales se realiza mediante registro continuo de mediciones cortas (comúnmente de 1s) y de forma consecutiva, que permiten evaluar la evolución temporal del nivel sonoro en decibelios (normalmente con ponderado A, dBA)², la figura 9 se muestra una gráfica de la evolución temporal del sonido producido por un avión al pasar por un lugar de referencia, donde se posicionan los terminales de monitoreo. Se ha marcado en rojo, el evento sonoro correspondiente al paso del avión. Las mediciones realizadas dentro del intervalo marcado, servirán para obtener un indicador de dicho evento.

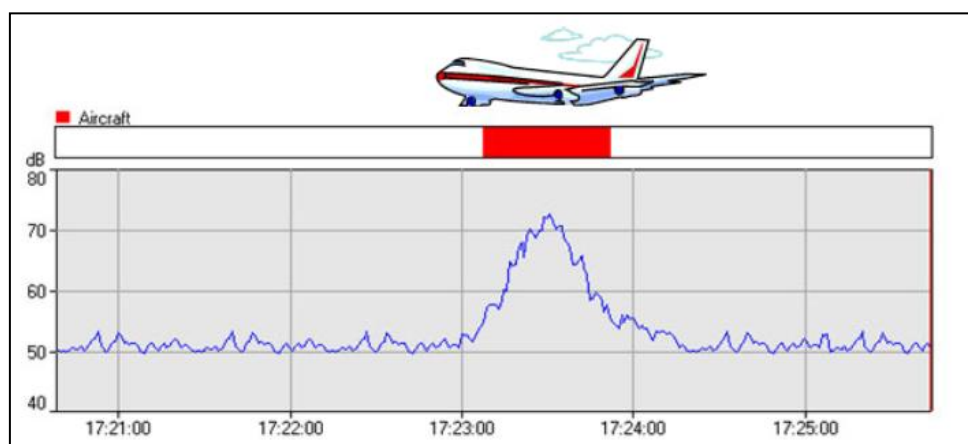


Figura 9 Evolución temporal del nivel sonoro durante el paso de de un avión [8]

Esta gráfica es la base que sustenta cualquier medición relacionada con el ruido de aviones, ya que se sustenta con dos objetivos básicos:

- Discriminar eventos sonoros: cuando el nivel de sonido se eleva por encima de un umbral durante un tiempo determinado, queda marcado un evento sonoro.
- Medir el evento sonoro: a partir de las mediciones de 1 segundo, y una vez definidos los instantes de inicio y final del evento sonoro es posible obtener nuevos indicadores que describen el evento en su totalidad

A partir de los registros efectuados por el instrumento de medida, se calcula unos descriptores para cada suceso aislado. La norma ISO 1996-2 [9] recomienda utilizar los siguientes descriptores:

² dBA: Es la medición del nivel de potencia o intensidad sonora medido con un filtro previo que elimina los sonidos de frecuencias bajas y muy altas, y deja sólo los que mejor son percibidas por el oído humano

- Nivel de presión sonora máximo, que describe el instante en el que el sonido alcanza su mayor nivel de presión sonora (L_{pmax}). Es habitual referirse a este índice como L_{Amax} (dBA).
- Nivel de exposición sonora integra la totalidad de la energía acústica registrada entre el instante de inicio y finalización del suceso sonoro, cuyo resultado se expresa de manera estandarizada. Es habitual referirse al nivel de exposición sonora como LAE (dBA).
- Nivel de presión acústica de pico: en desuso en acústica ambiental.

Es necesario indicar la duración de los sucesos, ya que la molestia generada por un sonido no depende únicamente del nivel máximo alcanzado, sino también de su duración. No obstante, el nivel de exposición sonora combina en un único descriptor el nivel acústico y la duración del evento que le permite estandarizar la cantidad de ruido producido por el evento sonoro de manera aislada, analizando el total de la energía como si estuviera concentrada en una duración de 1 Segundo (figura 10)

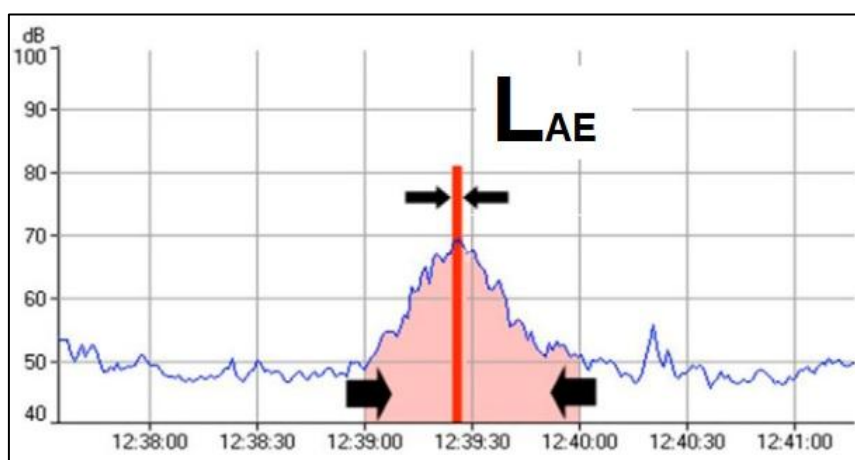


Figura 10 Integración realizada por el Nivel de exposición sonora [8]

La utilización del nivel de exposición sonora conlleva a la obtención de un listado de valores asociados a un evento sonoro. Para evaluar la infraestructura aeroportuaria se debe evaluar el ruido que produce todos los aviones conjuntamente y evaluarse conforme a un intervalo de referencia homogéneo y estandarizado (definido en la ISO 1996-1) (9). El nivel de presión sonora continuo equivalente (LA_{eqT}) que calculado a partir de los eventos sonoros, es el indicador para un intervalo de referencia

predefinido, permite evaluar la contaminación acústica producida por el conjunto de todos los eventos sonoros aislados (aviones). Este indicador permite evaluar conjuntamente, con una única cifra, y de manera totalmente objetiva y repetible, el número de operaciones, su duración y la cantidad de ruido que produce el conjunto de todas ellas. Para ello se integra la cantidad de ruido producido por todos y cada uno de los aviones (L_{AeqT}), y se estandariza con el intervalo de referencia (T). Por lo tanto, el nivel equivalente permite estandarizar respecto al intervalo de referencia la cantidad de ruido producida por todos los aviones de manera conjunta.

Antiguamente, era habitual la existencia de dos períodos de referencia que se corresponden con el periodo diurno (entre las 7h y las 23h en España) y nocturno (entre las 23h las 7h en España). Esta información aparece en documentos normativos como declaraciones de impacto medioambiental. Sin embargo, la legislación Europea más reciente (European Parliament 2002) siguiendo las recomendaciones y normativa europea, en lugar de dos, se establecen tres intervalos de referencia: día (07-19h), tarde (19-23h) y noche (23-07 h).

El impacto acústico producido por las infraestructuras del transporte se debe evaluar en un intervalo a largo plazo, que carece el entorno acústico predominante en la zona. La determinación de un nivel sonoro equivalente promedio anual, permite a los gestores de la infraestructura adoptar medidas de control o planes de acción que minimicen la afección producida por el ruido. Este es uno de los principales fines que se persiguen con la elaboración de mapas de ruido, y la determinación de huellas sonoras o isófonas de aeropuertos.

El nivel equivalente evaluado a largo plazo es el índice que se analiza cuando se elaboran mapas de ruido, no sólo en el caso de ruido de aeropuertos, también en el caso de ruido industrial, ruido del tráfico y tráfico ferroviario. Es el indicador al que se refieren los principales documentos de referencia a nivel internacional (**ISO 2007, ISO 2003, European Parliament 2002, WHO 1999, BOE 2007, IMAGINE WP2 partners 2006, BOE 2003**). Este indicador es el que se menciona en las principales normas de referencia para el monitorado de ruido de aviones, *ISO 20906: Unattended monitoring aircraft*

sound in the vicinity of airports (ISO 2009) y ARP 4721: Monitoring aircraft noise and operations in the vicinity of airports (SAE 2006a, SAE 2006b).

En el caso concreto del ruido provocado por los aviones, para llegar al indicador a largo plazo, resulta necesario discriminar y medir cada uno de los sucesos sonoros individuales, el resultado de estas medidas expuestas en la tesis doctoral ***“Aportaciones a los sistemas de discriminación de fuentes sonoras en la medida de ruido en aeropuertos”*** [8], son valores de referencias que se utilizarán para la realización de la aplicación en el que se basa este proyecto.

1.3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El **objetivo principal** de este proyecto de fin de carrera, consiste en el desarrollo e implementación de una aplicación capaz de detectar en tiempo real la activación de reversa de un avión, cuando éste aterriza. Este software se basa en el análisis de las señales acústicas capturadas.

Para la discriminación de ruido de aeronaves se implementará un módulo de adquisición de datos en tiempo real, en un sistema de detección de ruido de reversa (metodología TREND) mediante el desarrollo de una aplicación en LABVIEW.

En la implementación del sistema de detección de ruido de reversa, se plantean requisitos funcionales para que la aplicación cumpla con el objetivo principal del proyecto de fin de carrera, en el sistema se incluye las siguientes funcionalidades:

- Diseñar un método que capture unas grabaciones estéreo en la que posteriormente pueda ser analizada y procesada por la aplicación.
- Aplicar un Filtrado y acondicionamiento de las señales estéreo. Se requiere representar las señales acústicas en niveles de presión sonora para así ser procesadas en la detección y clasificación de eventos
- Aplicar técnicas de procesamiento digital para la determinación de la procedencia del sonido. Al determinar la procedencia de la fuente de ruido, es posible clasificar si el avión detectado está aterrizando o despegando-
- Construir un sistema de detección de eventos sonoros mediante la implementación de umbrales en las señales de audio capturadas. Los detectores de umbrales son herramientas muy útiles en la discriminación y clasificación de niveles sonoros.
- Implementar la metodología TREND para la identificación del ruido de reversa en el momento del aterrizaje.
- Elaborar un sistema en que se realice un reporte donde se va a documentar los datos relevantes de los eventos sonoros producidos en el aeropuerto en tiempo real.

2. APLICACIÓN DISEÑADA EN LABVIEW IMPLEMENTANDO EL SISTEMA TREND

Siguiendo con el objetivo principal del proyecto de fin de carrera, la aplicación se desarrolla para detectar si una aeronave, que aterriza en una pista específica del aeropuerto, activa la reversa para ayudarlo a frenar. El trabajo se basa en la metodología TREND (***Thrust Reverse Noise Detection***) descrita en la tesis doctoral “*Aportación a Los Sistemas De Discriminación De Fuentes Sonoras En La Medida Del Ruido En Aeropuertos*”[8].

La metodología TREND describe la búsqueda de 2 eventos sonoros llamados **EV1** y **EV2**, el primero de ellos es el evento que se activa cuando una aeronave aterriza discriminando otros eventos sonoros como despegues de aviones y otros sonidos de fondo, mientras que el **EV2** se producirá después del **EV1**, sólo cuando la aeronave utilice la reversa para frenar.

Además, para desarrollar la aplicación, se debe tener en cuenta que las mediciones acústicas se han obtenido mediante un sistema de monitorado, encargado de proporcionar los datos (señales acústicas) que se van a procesar para poder clasificar los eventos, de forma que la aplicación trabaje como un sistema de adquisición de datos en tiempo real. En el apartado 2.2 se describe el funcionamiento del sistema de captación, el formato del material acústico con el que se ha trabajado, la forma en que se obtuvo este material, características de las señales captadas, los instrumentos que se usaron como sistema de captación y la localización en la pista del aeropuerto.

En el apartado 2.3 se describe el desarrollo y funcionamiento de la aplicación. Para ello, es necesario dividir este trabajo en 2 módulos: En el primero se desarrolla un módulo denominado “**Módulo de Adquisición**”, el cual, es el encargado de proporcionar al siguiente módulo las muestras de audio captadas por el sistema de captación o

monitorado. En el segundo se trabaja con ***“Módulo de Procesado”***, el cual, toma las muestras recibidas en forma consecutiva y a cada una les realiza un procesado para buscar en cada una de ellas si se produce el evento 1 y posteriormente si en ese evento o aterrizaje se produce el frenado con la reversa. De esta forma la aplicación integra los 2 módulos donde se puede visualizar los datos adquiridos mediante la interfaz de usuario diseñada con las herramientas proporcionadas por el entorno de desarrollo LABVIEW [10, 11].

2.1. METODOLOGÍA UTILIZADA PARA LA DETECCIÓN DE RUIDO DE REVERSA (TREND)

El objetivo de esta metodología con respecto al ruido en reversa es determinar una metodología que permita definir un sistema automático de detección del ruido en reversa (Basado en la tesis *“Aportaciones a los sistemas de discriminación de fuentes sonoras en la medida de ruido en aeropuertos”* [8]).

En un aterrizaje, la aeronave se comporta como una fuente de sonido en movimiento que se va acercando poco a poco a la pista de aterrizaje. Al posicionar un sensor de ruido en un lugar cercano a la pista, el nivel de presión sonora aumentará cuando la fuente se acerque al sensor y cuando se aleje (pase por delante del sensor) el nivel comenzará a descender. Al posicionar el sensor en un lugar estratégico, la detección de cada aterrizaje se denominará como el primer evento sonoro **“EV1”** (apartado 2.3.2.1 describe el proceso de detección del aterrizaje)

Después que se produce el aterrizaje cuando el avión ha tocado pista, comienza a reducir la velocidad alejándose del sensor de ruido. A menos que se activa el empuje de reversa, las emisiones de ruido empiezan a reducirse y el nivel sonoro registrado se reducirá hasta llegar al nivel de ruido de fondo. En este caso, sólo EV1 habrá sido detectado al no producirse la activación de la reversa.

En el caso que la reversa esté activado, la fuente de sonido se aleja, aumentando sus emisiones de potencia acústica durante un tiempo, la cual producirá un segundo evento de sonido después de EV1. Por lo tanto, si se detectó EV1, el sistema intentará detectar el segundo evento sonoro al que llamaremos **“EV2”** (apartado 2.3.2.2 describe el proceso de detección de la activación de la reversa en un aterrizaje)

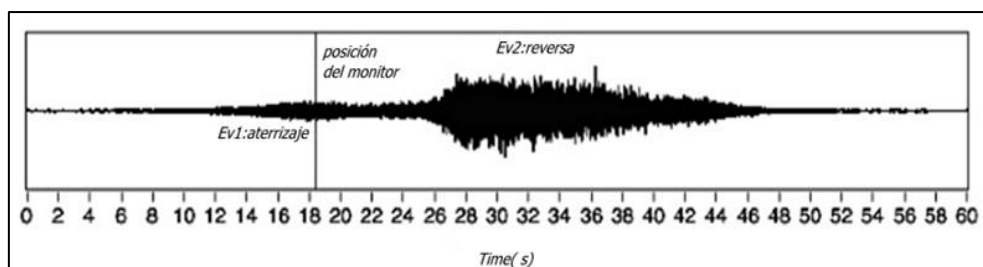


Figura 11 forma de onda de un aterrizaje con reversa [8]

En caso de que ambos eventos de sonido se puedan detectar, se aplicará una clasificación de eventos, por lo que EV1 se puede clasificar como un aterrizaje y EV2 como ruido de reversa, completando la identificación de un "aterrizaje con activación de reversa".

La figura 12 muestra el diagrama de bloques principal del sistema de TREND propuesto para la detección de la reversa. El primer paso consiste en la adquisición de las señales acústicas capturadas por el array de micrófonos bi-canal (**L-R**) (apartado 2.2 describe el sistema de captación). Para este fin, se prefieren los micrófonos directivos, con el objetivo de minimizar el efecto de ruido de fondo. La adquisición de datos debe realizarse sobre un ancho de banda de mínimo de 12 kHz, de esta manera se logra optimizar la capacidad de separación entre las clases de ruido.

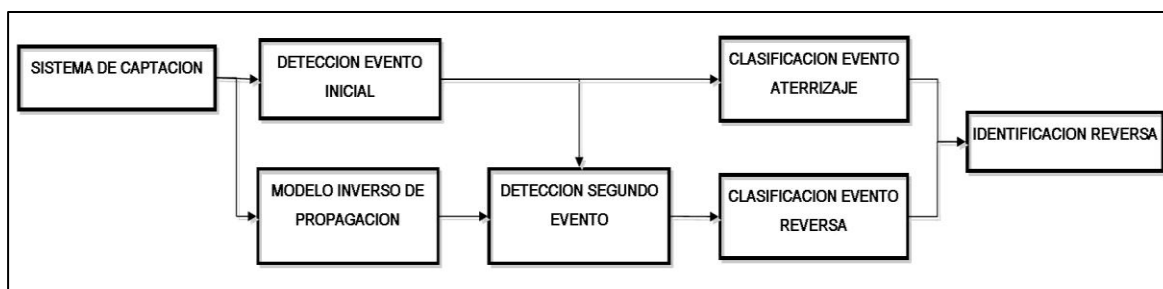


Figura 12 Diagrama de bloques del sistema TREND [8]

En segundo lugar, las señales son procesadas para detectar y clasificar los dos eventos de sonido consecutivos, EV1 y EV2. En el caso de que ambos eventos sean detectados y clasificados adecuadamente (EV1 como aterrizaje y EV2 como reversa) se sustanciará la identificación del objetivo, consistente en un aterrizaje con activación de reversa.

2.2. MEDICIONES Y CAPTURA DE AUDIO

Antes de empezar la descripción de la aplicación, es necesario indicar que este sistema se ha desarrollado con grabaciones sonoras y mediciones proporcionadas por el grupo de investigación I2A2 de la UPM. El papel de este apartado consiste en describir la manera en que se ha obtenido el material acústico, utilizado para realizar la aplicación, documentado en la tesis doctoral (*Aportación a Los Sistemas De Discriminación De Fuentes Sonoras En La Medida Del Ruido En Aeropuerto*).[8]

Las mediciones han sido realizadas en el aeropuerto de Madrid-Barajas y fueron efectuadas capturas de la actividad en la pista 33L, (*sustraído del cap.3 de la tesis, Asensio, C. 2012*) [8]. En dicha pista, según el modo de configuración y para tener una mejor clasificación de los aterrizajes y los despegues, se decidió realizar el seguimiento de la dirección de llegada del sonido al sensor de captación de ruido. Durante el aterrizaje el avión llega desde el sur mientras que los despegues el sonido llega desde el norte. Por otro lado, seleccionando una localización adecuada para el sistema de captación, durante la activación de la reversa el sonido llega desde la derecha del sensor, mientras que durante el aterrizaje la dirección del sonido sufre un cambio gradual de dirección de izquierda (sur) a derecha (norte). Para poder localizar la dirección del sonido y obtener grabaciones de buena calidad que facilite su posterior edición y clasificación de ficheros, se utiliza un micrófono estéreo que cumple la función de un array microfónico. Este array consta de dos micrófonos AKG cardioides separados a 35 cm. Ambos micrófonos se montaron con una pantalla anti-viento y fueron orientados simétricamente con respecto a la línea perpendicular a la pista, con un ángulo de 60° sobre dicha línea.

La campaña de medición se llevó a cabo en mayo de 2011 con la colaboración del personal de medio ambiente del aeropuerto. Se seleccionó una ubicación cerca de la pista 33L en la que cubría los aspectos acústicos, así como los estrictos criterios de seguridad del aeropuerto. El sistema de captación fue instalado en el tejado de un pequeño edificio auxiliar, colocado a unos 200 metros de la pista (véase la Figura 13).

Para las grabaciones, es preferible ubicar el sistema de captación en una zona muy próxima o incluso anterior al área donde el avión aterriza. De esta manera, resulta más sencillo detectar dos eventos sonoros separados.

Con este sistema se han realizado grabaciones continuas con la ayuda de un ordenador personal, el cual capturo ficheros de audio estéreo con una frecuencia de muestreo de 44100 Hz y una resolución de 16 bits. Gracias a la información respecto a la configuración de la pista (proporcionada por el aeropuerto) y a la escucha de las grabaciones, un técnico procesó y editó los ficheros para extraer eventos sonoros de 315 aterrizajes con reversa, 83 sin reversa y 252 despegues. Cada uno de estos eventos fue almacenado en ficheros independientes con formato “.WAV” con una media de duración de 1 minuto. Dichos ficheros se utilizaron para realizar entrenamientos y pruebas del sistema TREND.

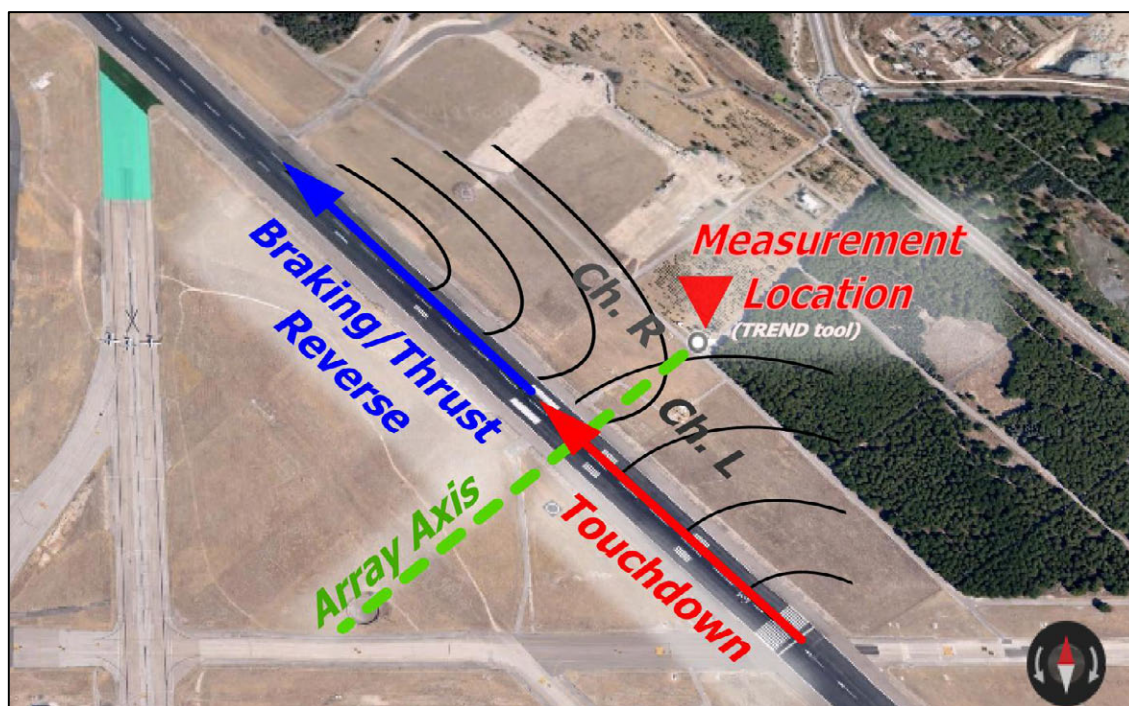


Figura 13 Localización del monitor de ruido

La figura 14 muestra el esquema de los requisitos que debe cumplir la ubicación para la metodología TREND (*thrust reversal noise detection*).

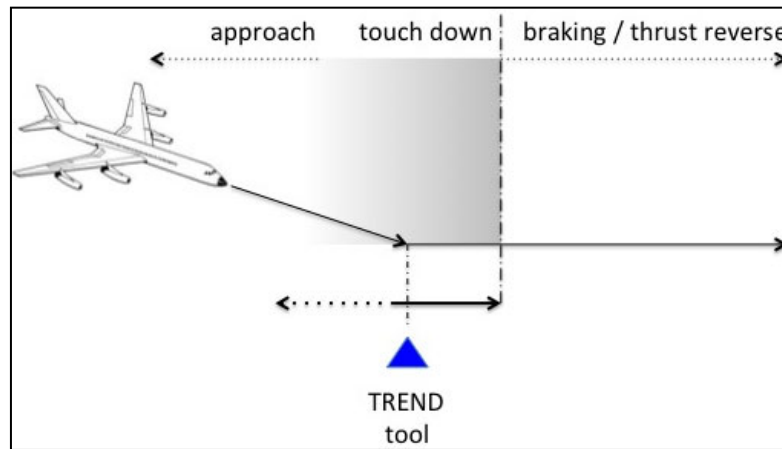


Figura 14 Requisitos para la localización del sistema de captación [8]

2.3. DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN

Para abordar el objetivo principal propuesto en este proyecto es necesario el diseño de un algoritmo que sea capaz de capturar y acondicionar señales acústicas, que posteriormente se pueda realizar un procesamiento y así determinar que se ha producido un frenado en reversa. Tomando las condiciones mencionadas en apartados anteriores, el diseño del sistema de detección de esta aplicación se ha desarrollado en 2 módulos con un control principal que supervisa las actividades en la aplicación (interfaz de usuario) (ver figura 15). Se plantea un diseño organizado por módulos para que facilite localizar errores en el programa en caso de fallos, o bien si es necesaria una modificación futura.

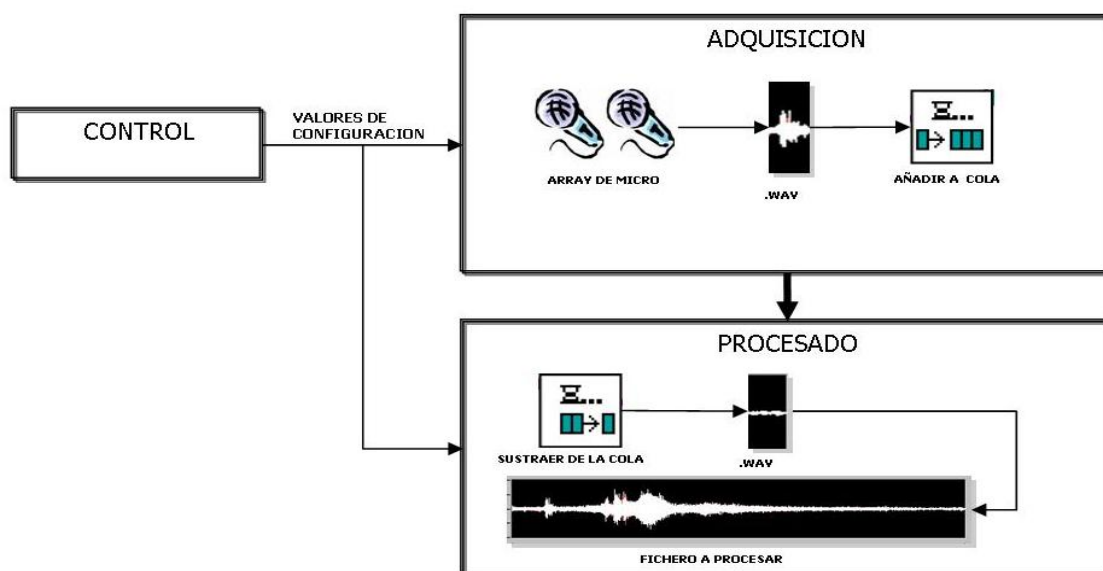


Figura 15 Diagrama de bloques de la aplicación del sistema de adquisición de datos simplificado.

El control principal es una interfaz de usuario creada en LABVIEW que se encarga tanto de la visualización de los datos adquiridos y procesados por la aplicación como los valores de configuración requeridos por los módulos de la aplicación, además de la visualización de los informes y datos de las señales procesadas. El primer módulo se encarga de la adquisición y extracción de los fragmentos de sonido que se recogen del sistema de captación (array de micrófonos), y la segunda parte que se encarga del procesamiento de las señales acústicas para el cumplimiento del resto de objetivos: filtrado y

medición de presión sonora, determinación de la procedencia del sonido, identificación de los 2 eventos para detectar el ruido en reversa (EV1, EV2) mediante el uso de la metodología TREND.

2.3.1. MÓDULO DE ADQUISICIÓN

Su funcionalidad principal es suministrar al módulo de procesado, las medidas y capturas sonoras de los acontecimientos ocurridos en la pista del aeropuerto, ya sea extrayendo muestras de las grabaciones de audio proporcionados como material de investigación descrito en el apartado anterior o proporcionado por las capturas hechas por el array de micrófonos. Después de la captura se quiere realizar a estos ficheros un procesado en tiempo real, para ello se debe escoger un cierto número de muestras representando una longitud adecuada en unidades de tiempo para poder realizar el procesado de una forma eficiente, por ello se utilizan fragmentos que varían su valor entre 100 milisegundos como mínimo y un máximo de 1 segundo en la aplicación, si se sobrepasan estos valores daría unas tasas de error mayores y al utilizar valores pequeños se tendrían que realizar mayores ciclos y la carga de procesado sería mayor, la cual afectaría el procesado en tiempo real.

Inicialmente, para desarrollar este módulo, se implementa una aplicación software para controlar el micrófono de la tarjeta de sonido integrado del ordenador personal (SoundBlaster³). La tarjeta de sonido se ha utilizado para que simule el comportamiento del sistema de captación, obteniendo medidas de campo (muestras de audio) en tiempo real.

En la construcción del módulo se realizaron pruebas de entrenamiento como captura de fragmentos de audio estéreo tanto continuos como fragmentos pequeños y en secuencia que a su vez, serían reconstruidos en la aplicación de prueba y procesados en ficheros de tipo **“.WAV”**. La importancia de esta parte del proyecto se debe a que es necesario analizar las características de las muestras de audio estéreo y poder buscar las herramientas de LABVIEW necesarias para que los 2 módulos puedan comunicarse entre

³ Sound Blaster es una familia de tarjetas de sonido creada por una empresa de Singapur llamada Creative Technology, ha sido durante muchos años el estándar de facto para el audio de los PC compatibles con IBM, antes de que el audio de PC se hiciera común.

sí, además se necesita saber los parámetros que se van a utilizar en el momento de procesar estas señales como la frecuencia de muestreo, resolución en bits como parámetros fijos, el número de muestras dado en segundos que se quieren capturar o leer del dispositivo, este último dato es un parámetro variable que se controla desde la interfaz de usuario de la aplicación.

Para acceder al dispositivo de sonido desde la aplicación, LABVIEW posee controladores o drivers que se comunican con los dispositivos conectados al PC, en este caso la aplicación accede según se muestra en la figura 16.

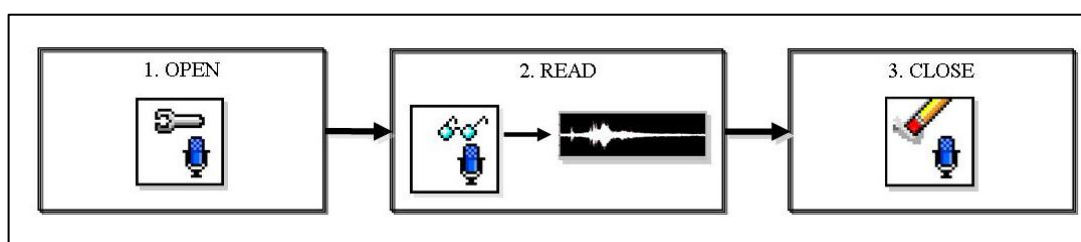


Figura 16 Procedimiento para el acceso a SoundBlaster

Primero se configura el formato en que se quieren grabar los ficheros del dispositivo de entrada (micrófono) introduciendo la información de entrada (frecuencia de muestreo, número de canales y la resolución de los datos), número de muestras por canal, tipo de muestras y el índice del dispositivo (*OPEN*). Se configuran grabaciones continuas de ficheros de audio estéreo a una frecuencia de muestreo de 44100 Hz y una resolución de 16 bits. En el segundo paso se usa la lectura (*READ*) del dispositivo de entrada de sonido, como parámetro de entrada se introduce el número de muestras que se quieren leer del dispositivo y así se dispone a procesar o simplemente visualizar lo que se ha captado del micrófono. Como tercer y último paso es el borrado del dispositivo de entrada de sonido (*CLOSE*), el cual, detiene la adquisición de datos, borra el buffer, devuelve la tarea al estado por defecto y borra los recursos asociados a la tarea.

Para el desarrollo de la aplicación el módulo de adquisición utiliza grabaciones mencionadas en el apartado 2.2 (*Mediciones y captura de audio*), de tal manera que simule una adquisición desde el sistema de captación (*array de micrófonos*) como si se estuviese trabajando en tiempo real. Para esto, se debe trabajar mediante herramientas

de LABVIEW que procesan ficheros en formato “.WAV” como los que se muestran en la figura 17.

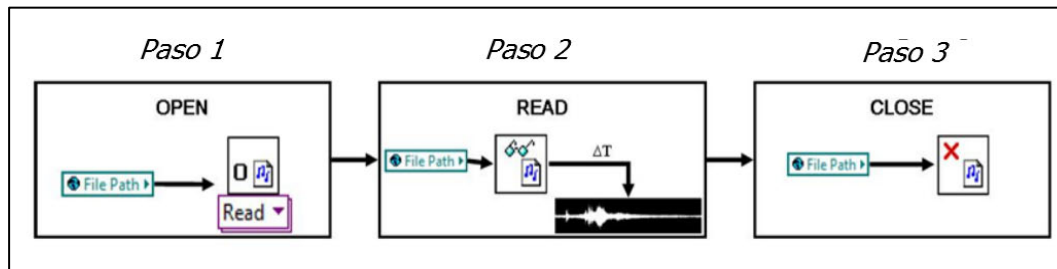


Figura 17 Procedimiento para el acceso a un fichero “.WAV”

Primer paso, se debe abrir el fichero “.WAV” que se quiere usar, en este caso para realizar la lectura del mismo, como parámetro se debe seleccionar la ruta del fichero. En el segundo paso se procede la lectura de los datos desde el fichero, recibe como parámetros la ruta del fichero y el número de muestras que se quieren leer, se puede leer todo el fichero a la vez o realizar la lectura de manera que se pueda especificar el número de muestras y el índice de las muestras se quieran extraer del fichero. Cuando se termina la lectura del fichero se procede a cerrar como tercer y último paso de este procedimiento.

Básicamente, el algoritmo del módulo de adquisición (figura 18), consta de un evento que se activa desde la interfaz de usuario al leer una dirección o ruta de un fichero. Esta ruta es recibida por el bloque “OPEN FILE”, después, el bloque “READ FILE” recibe del bloque anterior una referencia al archivo de audio y de la interfaz de usuario el número de muestras “N” que va a leer del fichero, ya que esto indica el fragmento de audio que se quiere adquirir en unidad de tiempo y se procede a añadirse a una cola en la cual, se comparte con el módulo de procesado y es la encargada de comunicar los dos módulos. Después de encolar las muestras, se leen las otras “N” muestras siguientes sucesivamente y de forma cíclica hasta terminar de leer todo el fichero de audio. Cuando se ha terminado la lectura del fichero se procede a cerrar y se salta al estado de espera de un nuevo evento de lectura de fichero.

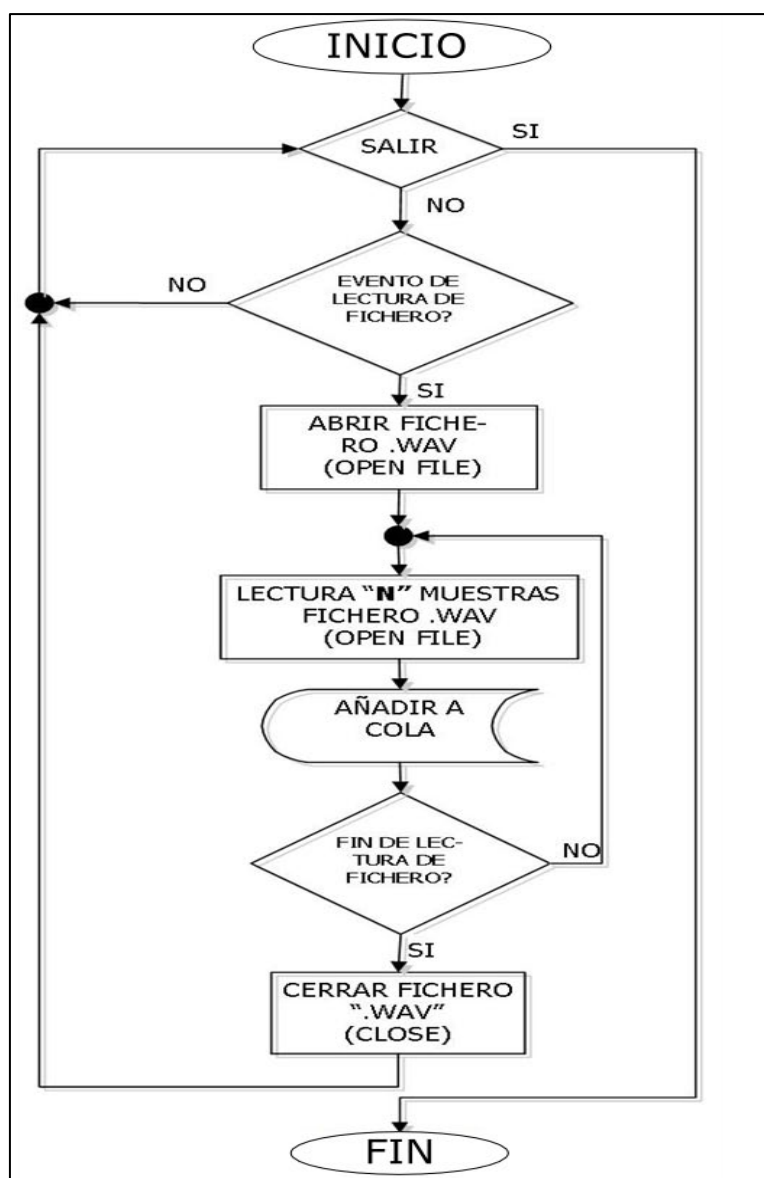


Figura 18 Algoritmo utilizado para el módulo de adquisición de la aplicación

2.3.2. MÓDULO DE PROCESAMIENTO

Al tener construido el módulo de adquisición, se procede a construir el siguiente módulo, este será el encargado de procesar la señal de audio para encontrar los 2 eventos (EV1, EV2 descritos en la metodología TREND). Como el módulo de adquisición simula el sistema de captación, este módulo espera de forma continua las muestras de una señal de audio con ciertas propiedades, las señales son bi-canal con una duración determinada entre 100 milisegundos a 1 segundo, así, cada fichero obtenido de la cola se va procesando individualmente y registrando cada dato adquirido. La figura 19 muestra de forma simplificada el algoritmo que se utiliza para desarrollar la aplicación con respecto a la búsqueda de los eventos acústicos.

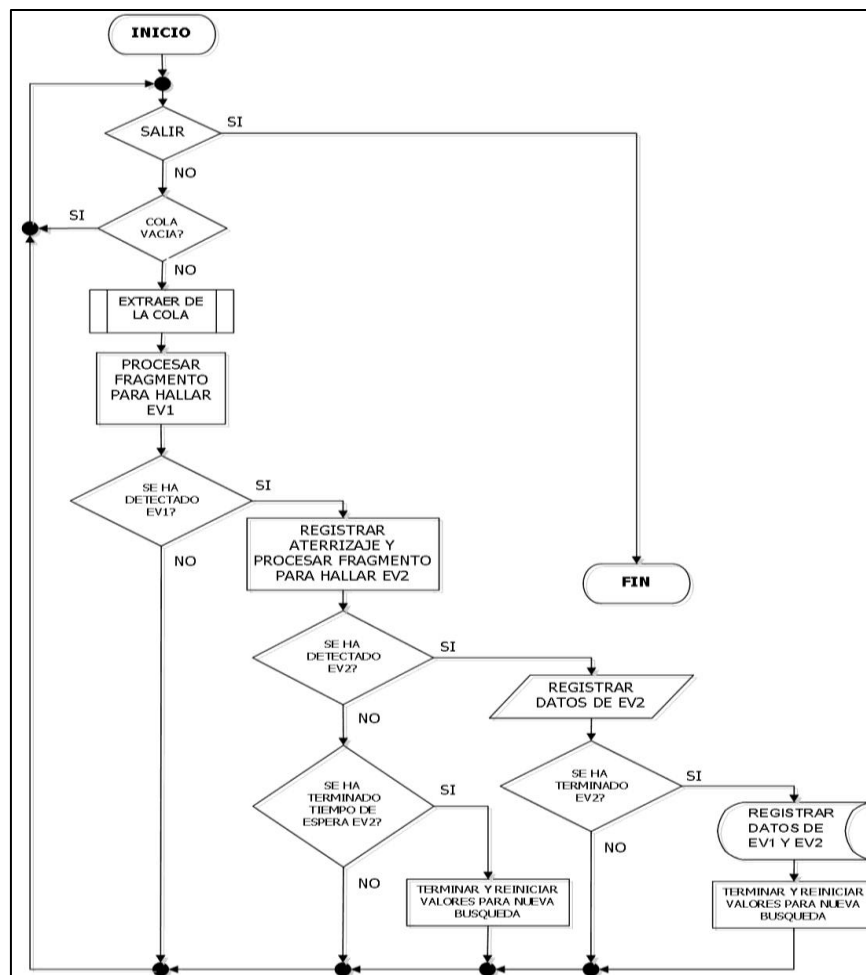


Figura 19 Algoritmo simplificado del procesado de la señal de audio

2.3.2.1. EVENTO 1: PROCESO PARA LA DISCRIMINACIÓN Y DETECCIÓN DEL ATERRIZAJE

El detector del EV1 es el responsable de la activación del sistema TREND como detección de un primer evento sonoro, causado por el aterrizaje de un avión.

Aunque la localización que se ha elegido para las mediciones está alejada de otras posibles fuentes sonoras considerables, pueden existir otras fuentes puntuales (maquinarias, coches, vehículos, etc.) que podrían incrementar las tasas de falsos positivos en la detección de este primer evento. Por ello, para optimizar el proceso de detección de EV1 se aplican las siguientes condiciones:

- Será analizado únicamente el canal L, ya que éste es el que apunta hacia los aviones que se aproximan en el aterrizaje. Su patrón de directiva reducirá la influencia del ruido de fondo.
- Debido a que la atenuación atmosférica del sonido es muy importante en el rango de alta frecuencia, sólo las fuentes de ruido muy cercana o muy potente (como el aterrizaje de un avión) son capaces de emitir niveles sonoros en cierto rango de frecuencias que pueden ser observados en el sistema de captación. Por ello se aplica un filtrado en la señal en el rango de frecuencia comprendido entre 5000 y 5200 Hz (filtro Butterworth, paso banda de orden 4). En la figura 20 se muestra el resultado de la aplicación de dicho filtro en la evolución temporal del nivel sonoro (L_p , dB), para un aterrizaje con reversa, resaltando la duración del evento EV1.

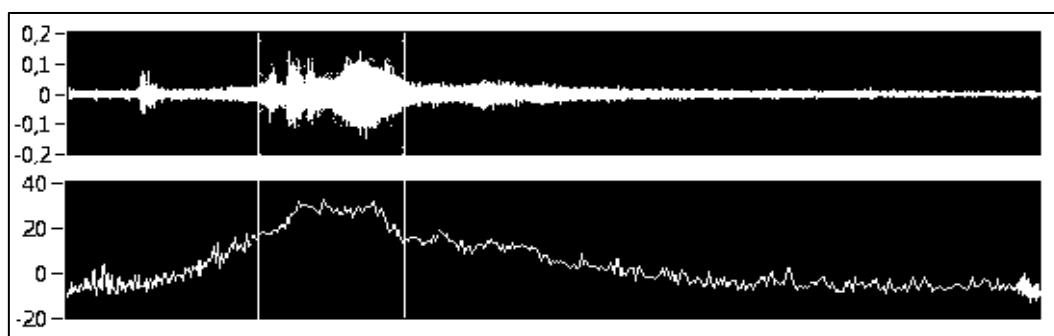


Figura 20 Efecto del filtrado paso banda en alta frecuencia

La función principal del detector EV1 es la detección de todos los aterrizajes que puedan ocurrir en dicha pista, esto se realiza mediante la fijación de un umbral de nivel (sobre L_p) y estableciendo un tiempo mínimo de duración. Este nivel de umbral es actualizado automáticamente y se incrementa 15 dB sobre el nivel percentil 90 $L_{90}(1min)$. Además se debe fijar la duración mínima de 5 segundos, lo que permite detectar cualquier aterrizaje en pista. El instante **TO** es el momento el cual se inicia el evento EV1.

Aunque el resto de módulos del sistema minimizará el efecto de falsos positivos (causados principalmente por despegues), la configuración de este módulo debe ser ajustado para evitar la detección de eventos sonoros menores. La figura 21 muestra el diagrama de bloques del evento EV1.

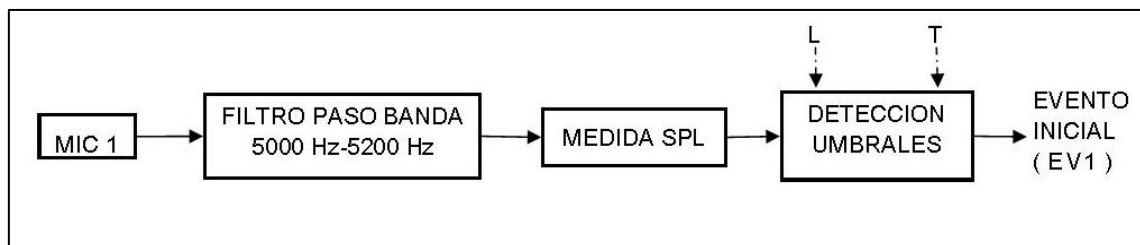


Figura 21 Diagrama de bloques del detector de eventos EV1

Para la detección del evento 1, haciendo referencia al aterrizaje de algún avión en pista, se comienza la búsqueda mediante la acción de un detector de umbral de nivel al cual, recibe la muestra de sonido adquirida después de pasar por un bloque de filtrado y un bloque que calcula el nivel temporal de presión sonora " $LP(t)$ " de la señal, no obstante, también hace falta un detector de dirección del sonido ya que dependiendo de su procedencia, se podrá determinar si el sonido proviene de un aterrizaje o un despegue, ya que no es suficiente con el detector de umbral. A continuación describiremos el diagrama de bloques que explica el funcionamiento del detector del evento 1 (Figura 22).

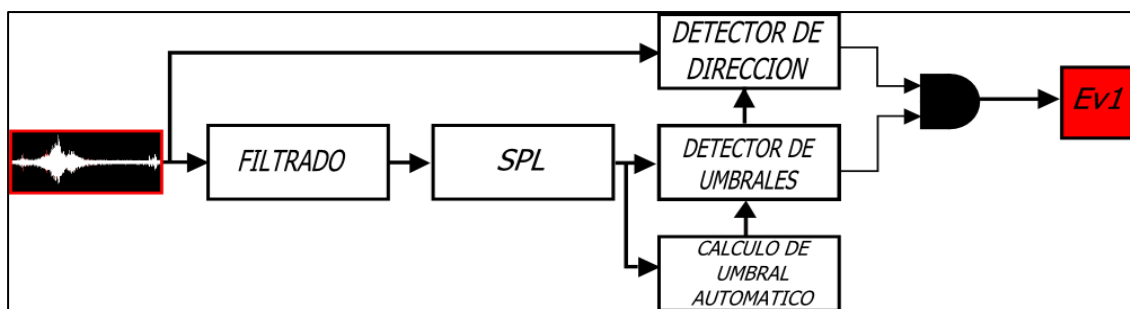


Figura 22 Diagrama de detección del evento EV1

Partiendo en que la señal llega a este módulo mediante la acción de desencolamiento de muestras enviadas desde el módulo de adquisición, esta señal de audio pasa por los siguientes bloques:

FILTRADO: en este bloque se debe aplicar un filtro Butterworth paso banda de orden 4 en un rango comprendido entre 5000 a 5200 Hz, este es un rango suficiente para discriminar un aterrizaje de otras fuentes acústicas que se encuentran alrededor del sistema de captación. Este es el primer paso del procesado que se realiza a las muestras de audio.

MEDIDA DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA: Para utilizar las muestras de audio en el sistema de adquisición de la aplicación, es necesario representar esta señal con unidades de medida en decibelios (dB), por ello se realiza una conversión de las muestras a un nivel de presión sonora, así será útil al momento de detectar el incremento de nivel de la señal acústica. Primero, se toman las muestras y se calcula su valor RMS de las muestras, después se convierten a unidades en (dB), así será conocida como la señal en nivel de presión sonora $Lp(t)$ (Figura 23).

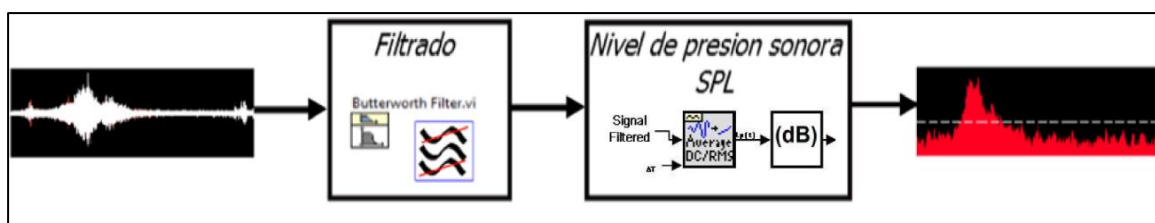


Figura 23 Filtrado y nivel de presión sonora

DETECTOR DE NIVEL DE UMBRAL: toma la señal $L_p(t)$, ya que esta señal es bi-canal o estéreo se toma sólo las muestras de la señal del canal L y se procede a detectar el instante en que esta señal sobrepasa el valor de un umbral que se aplica como parámetro de entrada. Además de detectar cuando se sobrepasa este valor, para que el evento EV1 se active, también es necesario que la detección tenga una duración de tiempo determinado, este parámetro se debe dar en número de muestras que representa la duración en segundos y se puede controlar desde la interfaz realizando la conversión de segundos a número de muestras, el detector cuenta el número de muestras en el que la señal de entrada es mayor al nivel de umbral, y por ello se activa EV1.

UMBRAL DE NIVEL AUTOMÁTICO: debido a que el ruido de fondo del aeropuerto durante el transcurso del día cambia considerablemente y puede generar falsos positivos en la detección el nivel de umbral, este bloque se diseñó para que el valor del umbral sea actualizado en ciertos periodos de tiempo. Para calcular este umbral se almacena un historial de muestras de $L_p(t)$ y se calcula el nivel percentil L90(1 min), y se incrementa 15 dB sobre el valor calculado. Para realizar un historial de 60 segundos, se crea un array de un tamaño suficiente para almacenar muestras de la señal **Lp** que representa la duración de este tiempo, al saber que el array se ha ocupado con las muestras por completo, se entregan estos datos a una función en Labview que calcula el percentil L90. De esta forma se actualiza el valor del umbral cada 60 segundos como valor determinado o también se puede variar este valor desde la interfaz de usuario de la aplicación.

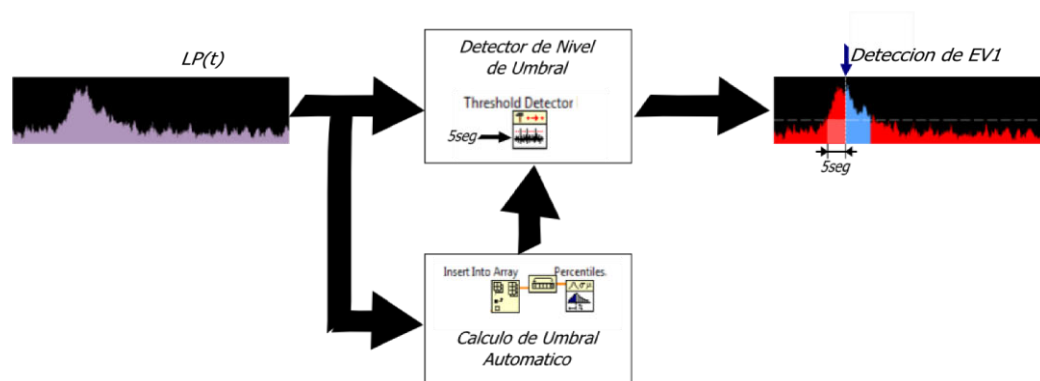


Figura 24 Proceso de detección de nivel de umbral para el Evento 1

DETECTOR DE DIRECCIÓN DE SONIDO: Cumple una función muy importante en la detección del evento 1, ya que es el último paso para activar el evento en el que clasifica si la acción sonora que se ha producido es un despegue o un aterrizaje. Como la dirección de la fuente de ruido es diferente cuando ocurre un aterrizaje que en un despegue y usamos un sistema de captación bi-canal descrito en el apartado anterior (*Mediciones y captura de audio*) lo que sugiere que en un aterrizaje llega primero al micrófono izquierdo o canal L con un intervalo de tiempo muy pequeño pero diferente de cero formando un ángulo $\phi > 90^\circ$, al pasar al frente del sensor la diferencia de tiempo es cero y el ángulo $\phi = 90^\circ$ (Figura 25), lo que significa que se tiene una señal que realiza un **cruce por cero**, por ello se utiliza un sistema de localización basado en la estimación del retardo (**time delay of arrival** TDOA) que hay entre la llegada de audio a cada uno de los dos micrófonos del sistema de adquisición(12).

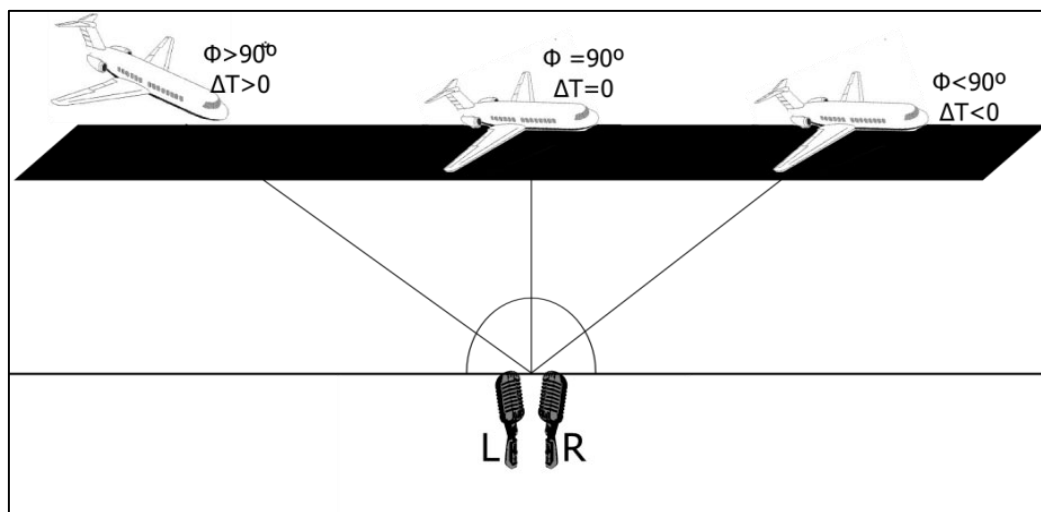


Figura 25 Captación del sonido en un aterrizaje

La figura 25 muestra que al pasar la aeronave al frente del array de micrófonos el valor del ángulo ϕ va cambiando gradualmente, lo mismo pasa con la estimación temporal del retardo " $\Delta T(t)$ " entre los dos micrófonos, cuando pasan al frente ΔT toma el valor de cero "**0**" lo que la estimación temporal en un aterrizaje va desde un valor positivo cruzando por cero a un valor negativo. En un despegue pasa lo contrario, el cruce va de negativo a positivo como se muestra en la gráfica de la figura 26.

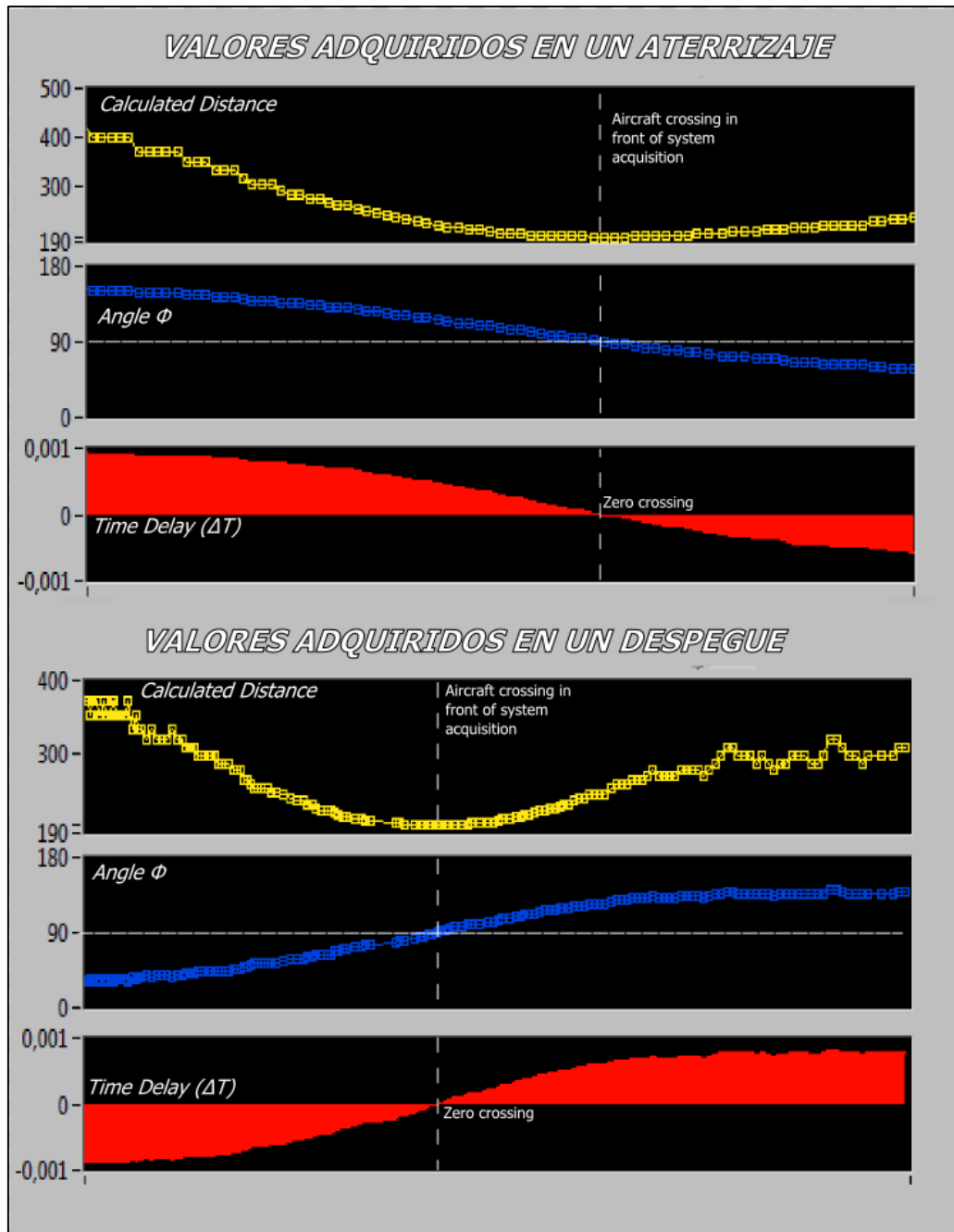


Figura 26 Diferencia de los valores temporales entre un aterrizaje y un despegue

Este bloque empieza a funcionar cuando el detector de umbral se activa en el instante T_0 y habilita éste detector de dirección, antes que la aeronave pase al frente del sensor de captación. El detector recibe la señal de audio adquirido desde el módulo de adquisición y se calcula la estimación de retardo con la herramienta de correlación cruzada "**Cross-Correlation**", después, debido a que la señal que entrega esta parte del bloque le falta linealidad se aplica un filtro antes de utilizar el cruce por cero "**Zero-**

Crossing", este detector de cruce por cero se configura para que sólo se active cuando el cruce sea de valor positivo a negativo, de lo contrario el evento se clasifica como un despegue **"TURN-OFF"**. Esta acción se puede etiquetar como el instante T1 en el que se inicia la búsqueda del evento 2.

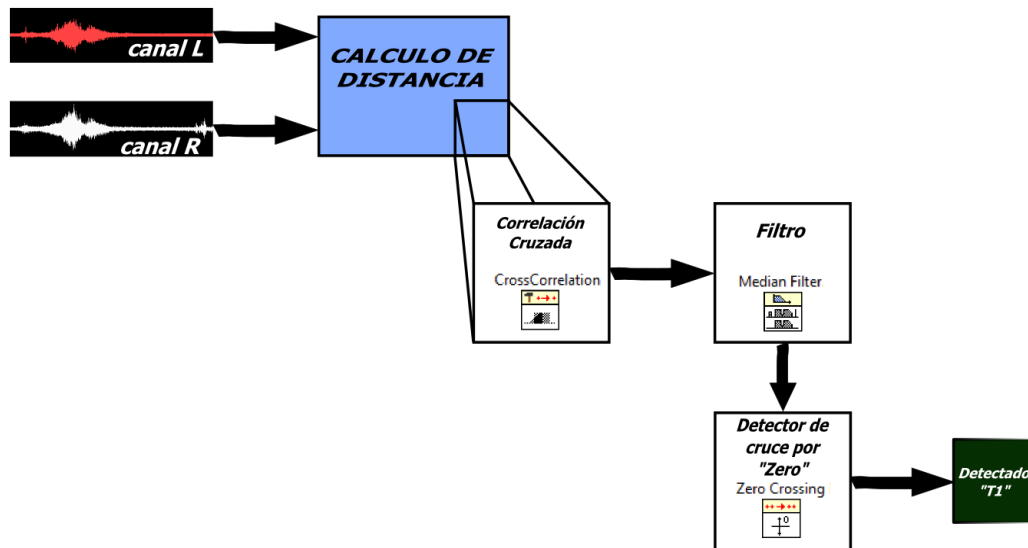


Figura 27 Detector de la procedencia del sonido para activar EV1

La herramienta que se aplica para la estimación de retardo se encuentra en el bloque de **"Cálculo de Distancia"** que se describe en el apartado **"2.3.2.2 Estimación del nivel de potencia acústica usando el modelo de propagación inverso"**, debido a que es una herramienta importante para la detección de **EV2**.

2.3.2.2. EVENTO 2: PROCESADO PARA LA DETECCIÓN DE LA ACTIVACIÓN DE LA REVERSA EN UN ATERRIZAJE

A partir de este punto, se estima que los datos capturados hacen referencia a un aterrizaje y que el evento EV1 se ha activado, así se inicia el monitoreo o la búsqueda del evento EV2. La detección del segundo evento EV2 también se realiza mediante umbrales, de manera similar a la descrita en el evento EV1. En este caso, las condiciones aplicadas son las siguientes:

- Se analizará el canal R, ya que éste apunta hacia la zona de frenado y posiblemente se active la reversa.
- De acuerdo a la distribución espectral del evento sonoro del frenado en reversa, se aplica un filtro paso banda de baja frecuencia desde 100 Hz a 1000 Hz (filtro Butterworth, paso banda de orden 4).
- La detección del evento se realiza por umbrales aplicados sobre la evolución de tiempo del nivel de potencia sonoro $L_w(t)$, éste se estima a partir de los niveles de presión sonora (se detalla más adelante 2.3.2.2 ***“Estimación del nivel de potencia acústica usando el modelo de propagación inverso”***).
- Para la activación del evento EV2 se podrá producir después de la detección del evento EV1, además se deben incluir algunas restricciones y por ello, el detector no se activará hasta que ocurra T3 (se detalla más adelante en el apartado 2.3.2.2.1 ***“Inconvenientes en la detección del evento EV2”***).

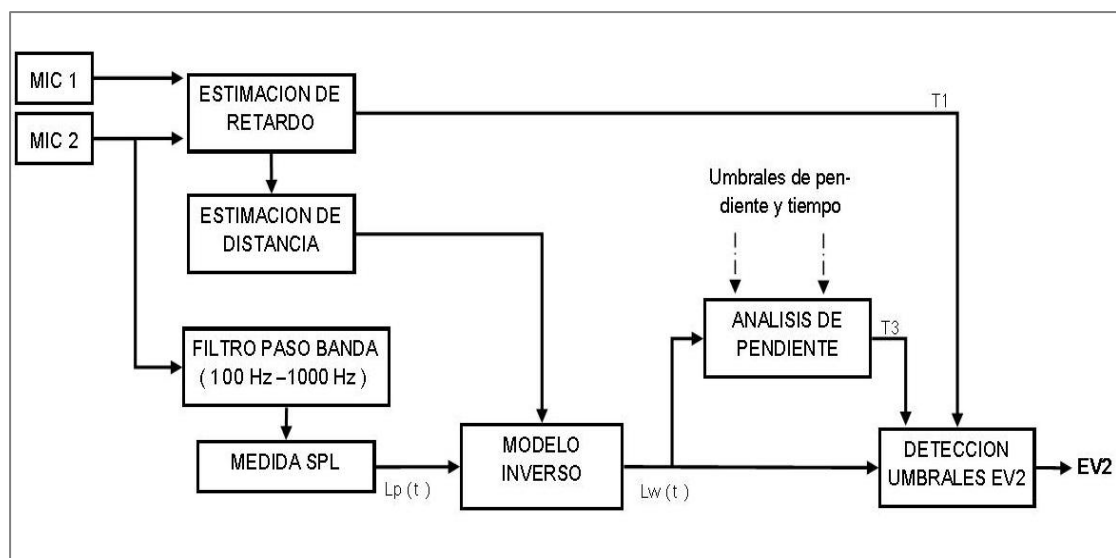


Figura 28 Diagrama de bloques del detector de eventos EV2

2.3.2.2.1 INCONVENIENTES EN LA DETECCIÓN DEL EVENTO EV2

La detección del evento EV2 se debe realizar una vez que el evento sonoro del aterrizaje haya finalizado, coincidiendo con el final del evento EV1 pero debido a los diferentes casos que se han observados respecto a la activación de la reversa (ver figura 29), no es posible ajustar el umbral del evento EV1 de una manera precisa para todos los casos.

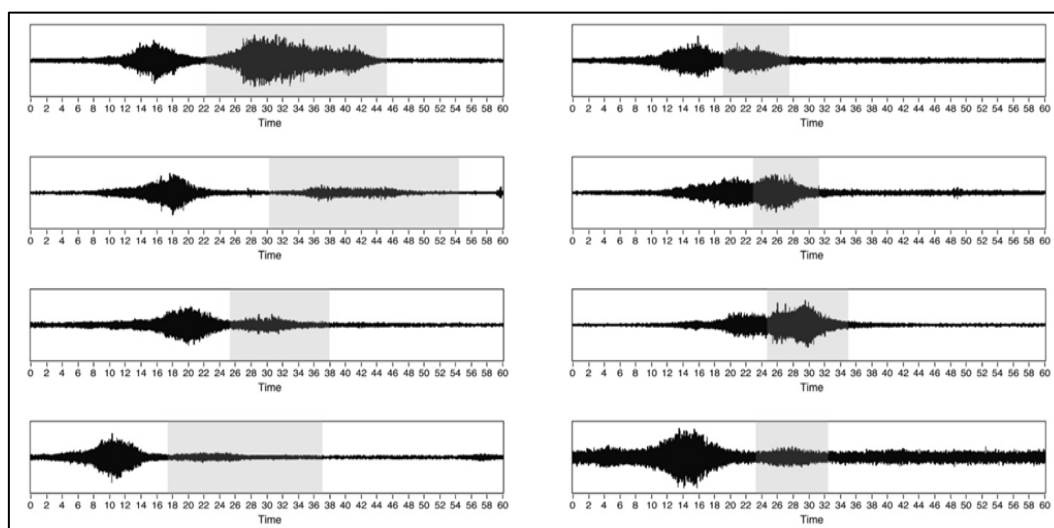


Figura 29 Forma de onda de la reversa en diferentes casos [8]

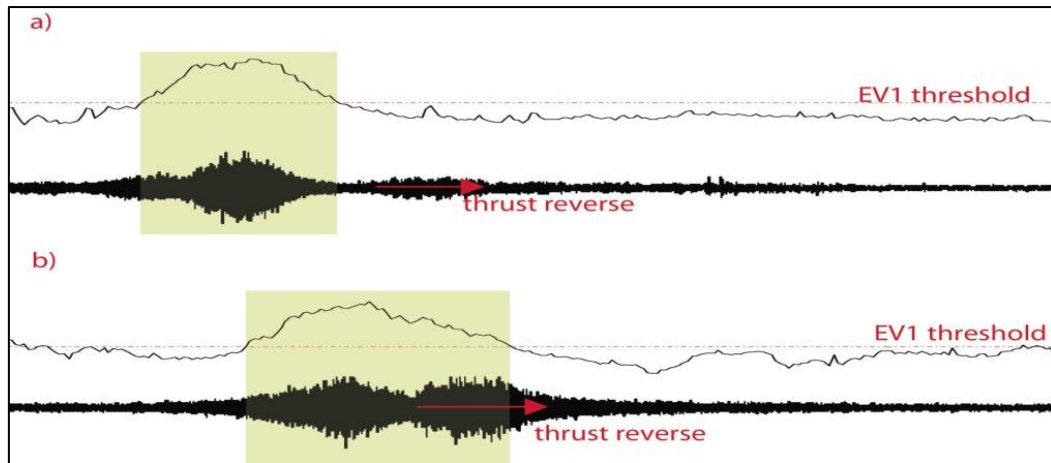


Figura 30 Detección de evento EV1 [8]

En ciertos casos en que la reversa tiene una activación temprana (como se muestra en la figura 30), el tiempo en el cual finaliza EV1, no se puede tomar como referencia para iniciar la búsqueda del evento EV2, por ello, se deben incluir, además de la detección de umbral, ciertas condiciones para la detección del evento EV2:

- La detección debe realizarse después de **T1**, debido a que es el momento en que el avión pasa por delante del eje del array. **T1** debe ser posterior al momento **T0** como se muestra en la figura 31.
- La detección se debe realizar después de **T2**, debido a que es un momento en el que el nivel de potencia acústica $L_w(t)$ empieza a descender
- La detección también se debe realizar después de **T3**, ya que es el instante en que el nivel de potencia acústica empieza a incrementarse de forma prominente después de **T2** (ver sección 2.3.2.2.3 *Detección de T2 y T3*).

De esta manera es posible garantizar que sólo eventos acústicos importantes como la activación de la reversa, activen el detector del evento EV2.

Por otra parte, los momentos **T2** y **T3** se calculan a partir del análisis de la pendiente en un registro temporal a partir del nivel de potencia de sonido $L_w(t)$.

En la figura 31 se muestra un esquema de tiempos en el que se muestra la totalidad del proceso.

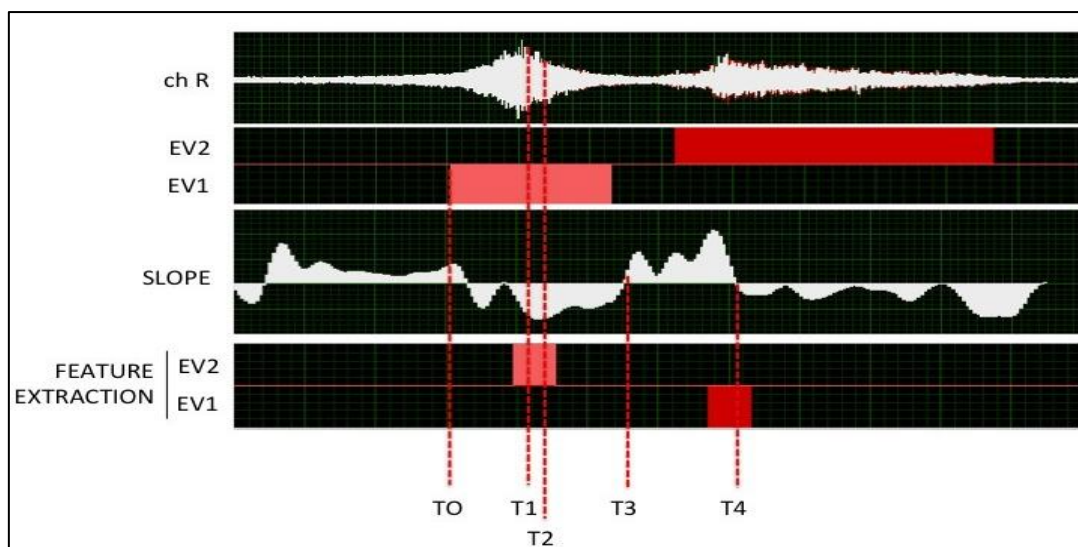


Figura 31 Diagrama de bloques de los tiempos de la metodología TREND [8]

Inicialmente sólo el detector **EV1** está en funcionamiento. Cuando $L_p(t)$ (filtrado en 5000-5200 Hz) supera el umbral fijado durante un tiempo mayor al especificado, se detecta el evento **EV1**, comenzando en T_0 . Dentro de **EV1** el avión cambiará su posición de izquierda a derecha en T_1 . Después de T_1 el nivel sonoro empieza a decrecer en T_2 . A partir de este instante, si se activa la reversa las emisiones acústicas se incrementan nuevamente y la pendiente del nivel de potencia acústica aumenta sus valores en cierto tiempo determinado. Este instante será T_3 tal que se define como el momento en que la pendiente sobrepasa un umbral durante un cierto intervalo de tiempo, este momento es también la activación del detector de **EV2**. En el caso en que **EV2** sea detectado, es necesario extraer los datos de ambos eventos (EV1 y EV2) y realizar una clasificación de los datos adquiridos por la aplicación en el que se realiza un reporte de los datos de todos los eventos detectados (ver apartado 2.3.2.3 Registro y grabación de eventos). La extracción de las características de estos eventos descritos se realiza en el intervalo entre T_1 y T_4 que corresponden con el inicio de EV1 y final de EV2 (T_4 corresponde con el instante en que la pendiente de $L_w(t)$ cruza por cero en sentido descendente).

2.3.2.2.2 ESTIMACIÓN DEL NIVEL DE POTENCIA ACÚSTICA USANDO EL MODELO DE PROPAGACIÓN INVERSO

A pesar del filtrado de baja frecuencia aplicado para resaltar el sonido producido por la reversa con respecto a otras fuentes sonoras, en ocasiones es difícil de distinguir el evento sonoro debido al bajo nivel emitido ya sea por las fuentes acústicas de fondo o por el ruido del propio aterrizaje, además, como el avión está en movimiento, la distancia desde la fuente al receptor es variable (ver figura 32.A), esto puede ocultar parcialmente que la reversa esté activada (figura 32.B). Cuando se realiza la estimación del nivel de potencia acústico emitido por el avión, se hace más sencillo detectar la reversa ya que las emisiones aumentan de forma repentina con la activación. El efecto de la distancia incrementa el rango de EV2 con respecto a EV1 (figura 32.C).

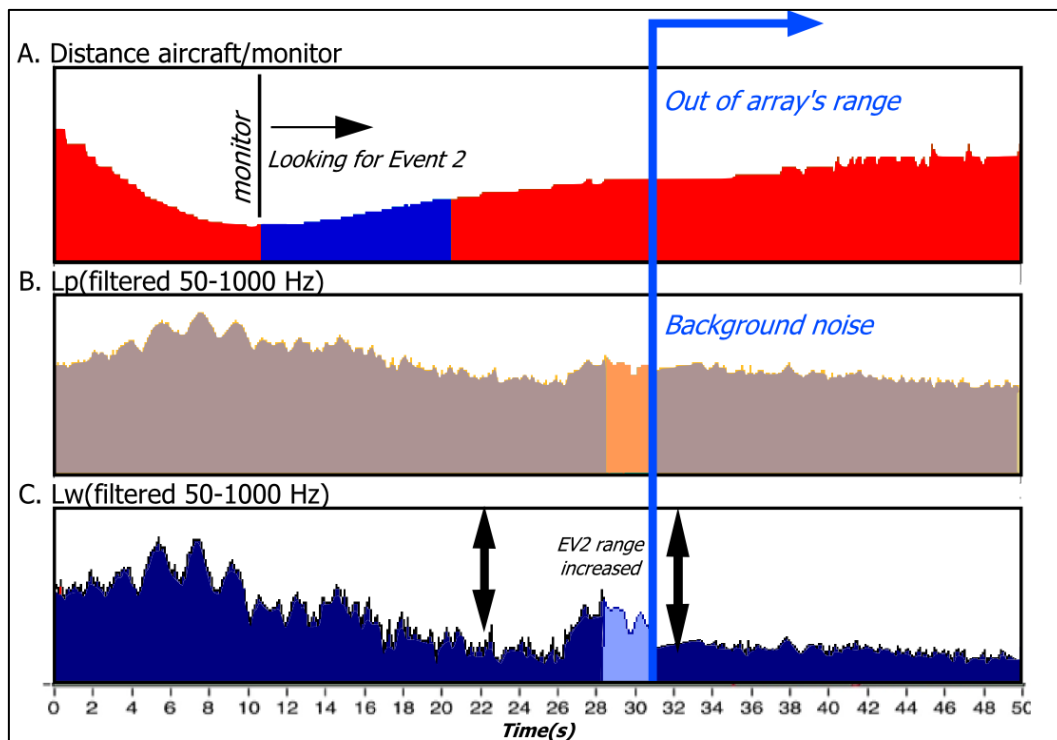


Figura 32 Efecto producido por la utilización del nivel de potencia sonora (L_w) frente al nivel de presión sonora

Para estimar la potencia acústica emitida por la aeronave, se ha usado como referencia el enfoque presentado en (Asensio et al. 2007) [8], realizar una estimación del nivel de

potencia acústico mediante el modelo inverso de propagación de sonido simplificado (Ecuación 1) basado en ISO 9613 (ISO 1996). [12]

$$Lw(t) = Lp(t) + 20 \log r(t) + \frac{r(t)}{1000} \propto \quad \textbf{Ecuación [1]}$$

Donde $Lw(t)$ es el nivel de potencia sonora o acústica en (dB), $Lp(t)$ es el nivel de presión sonora en (dB), $r(t)$ es la distancia desde la fuente al receptor (m), y \propto es un coeficiente que describe la atenuación atmosférica del sonido con respecto a la distancia (dB/Km).

Para el cálculo de la distancia entre el sistema de captación y el avión se ha realizado mediante la aplicación de un método de localización basado en la estimación del retardo (time delay of arrival TDOA) que existe entre la llegada del sonido a cada uno de los dos micrófonos que componen el array) (12).

Para la aplicación del modelo inverso simplificado, la estimación de la distancia desde la fuente acústica al receptor se realiza suponiendo que la fuente está desplazándose a lo largo de la pista.

En la ecuación 2 muestra el cálculo de la distancia conforme al esquema mostrado en la figura 32.

$$r = \frac{d}{\sin(\cos^{-1}(\cos(\phi)))} \text{ (m)} \quad \textbf{Ecuación [2]}$$

Donde d es la distancia del array de micrófonos (sistema de captación) a la pista y ϕ es el ángulo que corresponde a la dirección de llegada del sonido, calculada según la ecuación 3. [12]

$$\cos(\phi) = \frac{c \cdot \Delta TLR}{XLR} \quad \textbf{Ecuación [3]}$$

Donde ΔTLR es el retardo de las señales que llegan a los dos micrófonos y XLR es la distancia entre los centros acústicos de los dos micrófonos. El retardo de ΔTLR se calcula utilizando el método de la correlación cruzada en el dominio del tiempo.

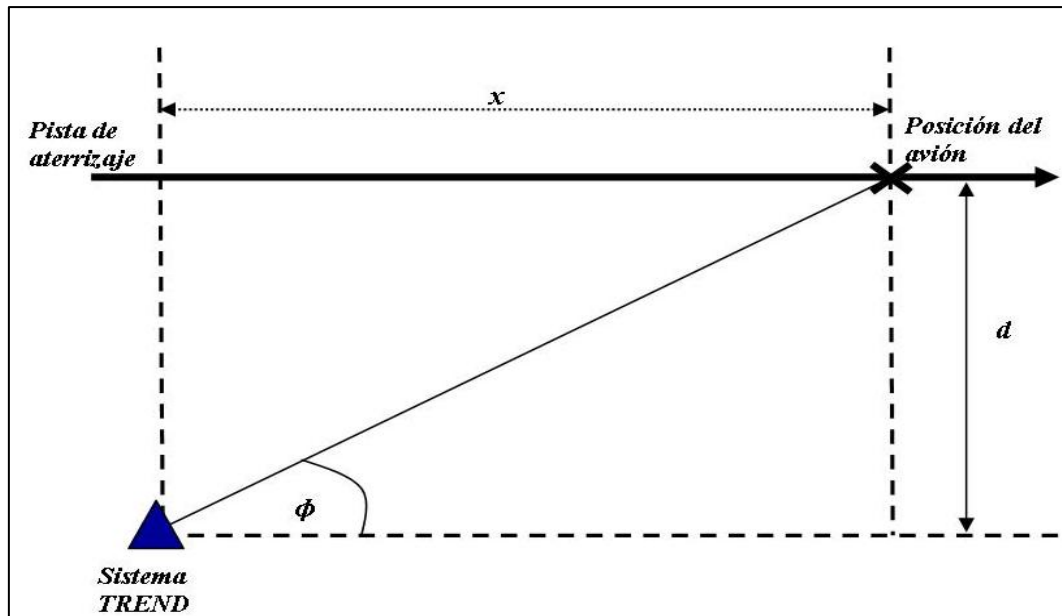


Figura 33 Modelo simplificado para el cálculo de la distancia

Con este enfoque, el ruido de reversa resulta enfatizado con respecto al sonido del aterrizaje, debido a que la distancia de la fuente acústica al receptor es menor durante EV1 que durante EV2. Por lo tanto, el rango dinámico de EV2 se incrementa. Este incremento de rango también se produce con relación al ruido de fondo, ya que sólo se tiene el ruido de fondo, el estimador de TDOA está fuera de su rango de funcionamiento, el retardo (es minúsculo) hace que la distancia calculada sea mínima (ver figura 33).

Utilizando este enfoque, la eficiencia del detector EV2 se ha incrementado considerablemente, aunque existen algunos factores importantes que no se consideran en el modelo inverso, o se han llegado a simplificar:

- El coeficiente de atenuación atmosférico de sonido, α , ha sido considerado como una constante en el rango de 100-1000 Hz.
- El modelo del avión tiene un efecto sobre la emisión de ruido, el espectro, la directivita, la localización de los motores... ninguno de estos factores han sido incluidos en el modelo.
- La posición donde el avión aterriza es bastante definida para la mayor parte de los aviones (como se puede apreciar una marca negra en la pista en la figura 11). Pero,

dependiendo también del destino final del avión (terminal de destino salida de pista a seguir), algunos de estos pueden tomar tierra con cierto retraso, y pueden estar en el aire cuando pasan por delante del sistema de captación sonora (**TREND**).

- Durante el acercamiento del avión, la distancia entre el avión y el micrófono se va reduciendo poco a poco, también el eje vertical, mientras que el modelo considera que la posición vertical de la fuente sonora es constante.

Teniendo las indicaciones descrita anteriormente y calcular la estimación del nivel de potencia acústica, se usan dos bloques fundamentales (figura 34).

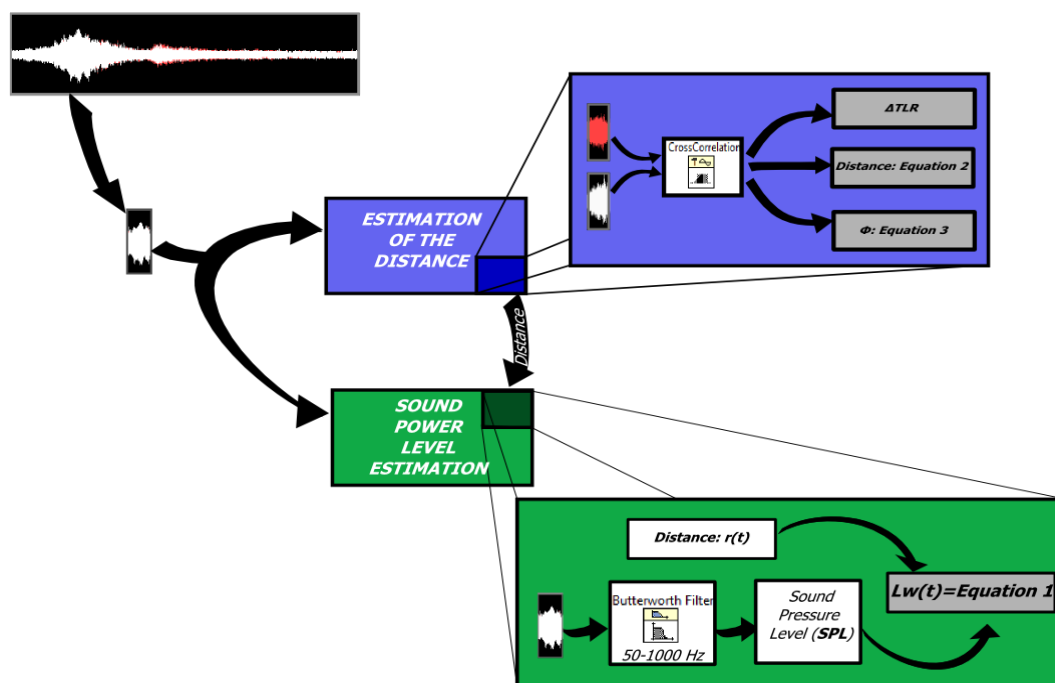


Figura 34 diagrama de bloques del cálculo del nivel de potencia de sonido estimado

- **CÁLCULO DE LA DISTANCIA ESTIMADA:** este cálculo comienza tomando las muestras de la señal de audio bi-canal captada por los dos micrófonos, se obtiene el retardo estimado de las señales con el cálculo de correlación cruzada como se describió en el apartado 2.3.2.1, donde se explica el funcionamiento del “*detector de dirección de sonido*”. Con estos valores se aplica la **ecuación 3** para hallar el valor del ángulo (ϕ) el cual se necesita para calcular la distancia temporal estimada de cada muestra aplicando a su vez la **ecuación 2**.

- **CÁLCULO DEL NIVEL DE POTENCIA ACÚSTICA ESTIMADO:** en este bloque se añade el **bloque de filtrado** correspondiente al espectro de frecuencias entre **100 a 1000 Hz** en el que se discrimina la señal de ruido de reversa. Después, la señal filtrada pasa por un bloque para determinar el nivel de presión sonora “**SPL**”. Con los valores proporcionados por el bloque del cálculo de la distancia estimada se aplica la **ecuación 1** y se obtiene “**la estimación del nivel de presión acústica**” de la señal de entrada. Cabe destacar que en la aplicación, el coeficiente de atenuación atmosférica “ α ” se puede controlar desde la interfaz de usuario con un valor por defecto de **3 db/Km**.

El siguiente paso que se necesita es la descripción del detector de umbral, este es muy similar al detector de nivel de umbral utilizado para la detección del primer evento (ver descripción de la figura 24), sólo que a este bloque se le ha añadido una habilitación para que entre en funcionamiento sólo cuando se haya activado “EV1” en el instante “T1” (figura 35)

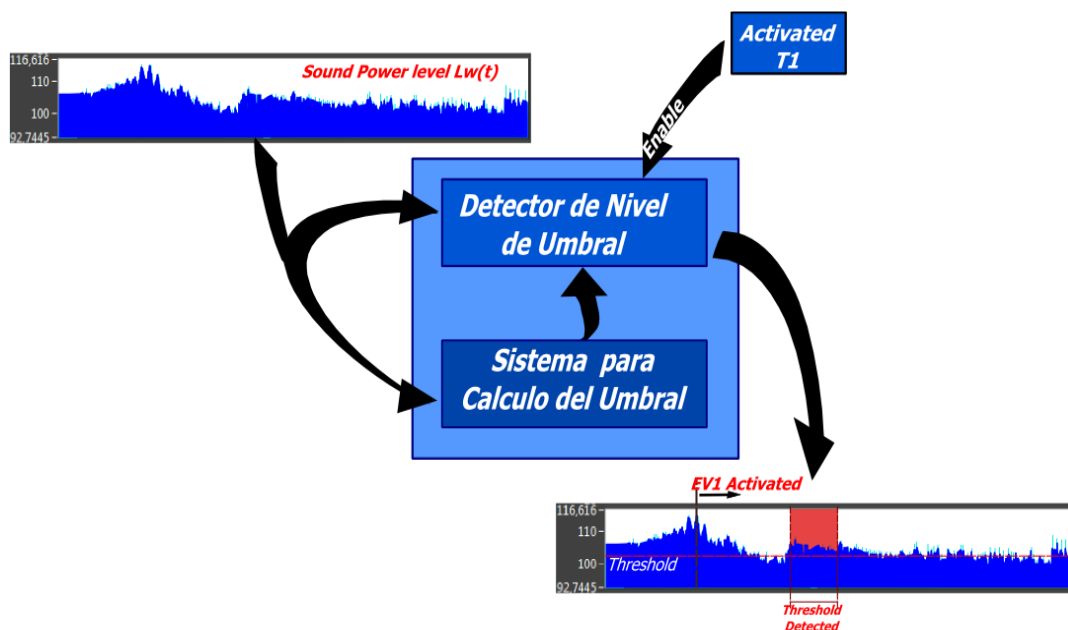


Figura 35 Proceso de detección de nivel de umbral para el Evento 2

Con el detector de nivel de umbral no es suficiente para la detección del ruido en reversa como se explica en el apartado “2.3.2.2.1 Inconvenientes en la detección del evento EV2” ya que se deben analizar ciertos patrones en la señal para así poder determinar que se ha producido la activación de la reversa mediante la búsqueda de tres

instantes específicos (*detección de $T1$, $T2$, $T3$*) analizando la pendiente calculada de la estimación del nivel de potencia que se detalla en el siguiente apartado.

2.3.2.2.3 DETECCIÓN DE $T2$ Y $T3$ CON EL ANÁLISIS DE LA PENDIENTE DEL NIVEL DE POTENCIA ACÚSTICA ESTIMADA

La detección de instante **$T1$** es el punto de partida para iniciar la búsqueda del evento 2 y la implementación de la aplicación se describe en el apartado “2.3.2.1 Evento 1: Proceso para la discriminación y detección del aterrizaje”.

El ruido del aterrizaje es aún elevado después del instante **$T1$** , y dependiendo de la directividad de la aeronave, este podría seguir incrementando. Para prevenir el incremento de los falsos positivos del detector EV2, como se puede observar en la figura 36, es necesario tener en cuenta la estructura temporal del proceso discriminación de eventos.

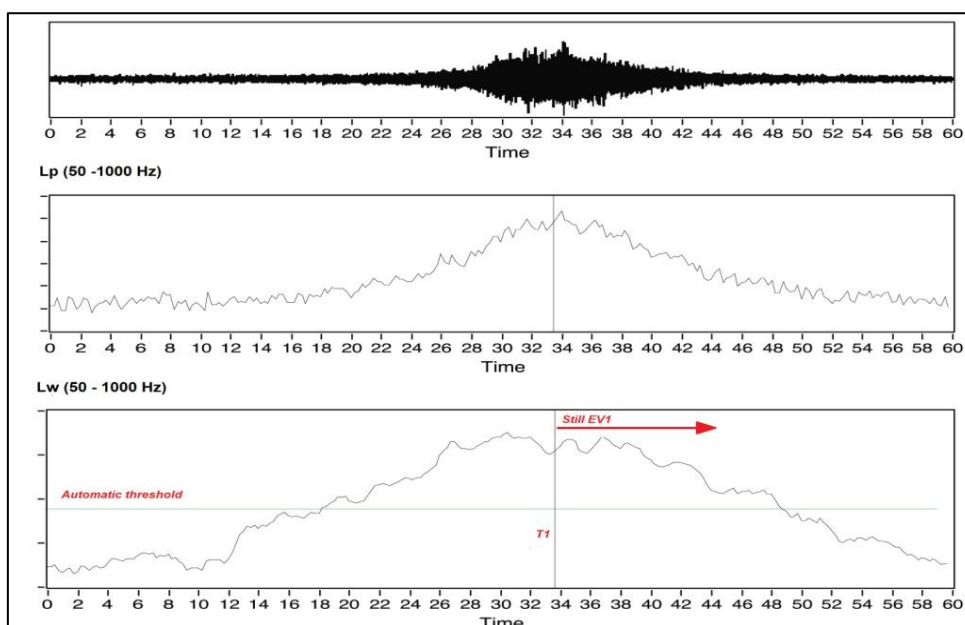


Figura 36 Problemas asociado a la detección de EV2 [8]

A unos instantes de **$T1$** (o durante $T1$) el nivel de potencia debe empezar a reducirse, debido a la reducción de la velocidad del avión. Este instante será **$T2$** , cuyo cálculo es necesario para analizar la tendencia de tiempo de $Lw(t)$ durante 2 segundos. Esto debe realizarse por medio del análisis de su pendiente. Para ello, para cada intervalo en el que

$L_w(t)$ es estimado (250ms). El sistema calcula la pendiente de ésta evolución temporal en los próximos 2 segundos mediante una regresión lineal. Cuando esta pendiente de largo plazo se vuelve negativa por un periodo superior a 500 ms, se considera que EV1 está empezando a decrecer, y así se define **T2**.

Después de **T2**, la pendiente es analizada de nuevo para hallar eventos acústicos fuertes (como la activación de la reversa), teniendo cierta duración por encima de un umbral de pendiente. Esto determina **T3** (figura 37).

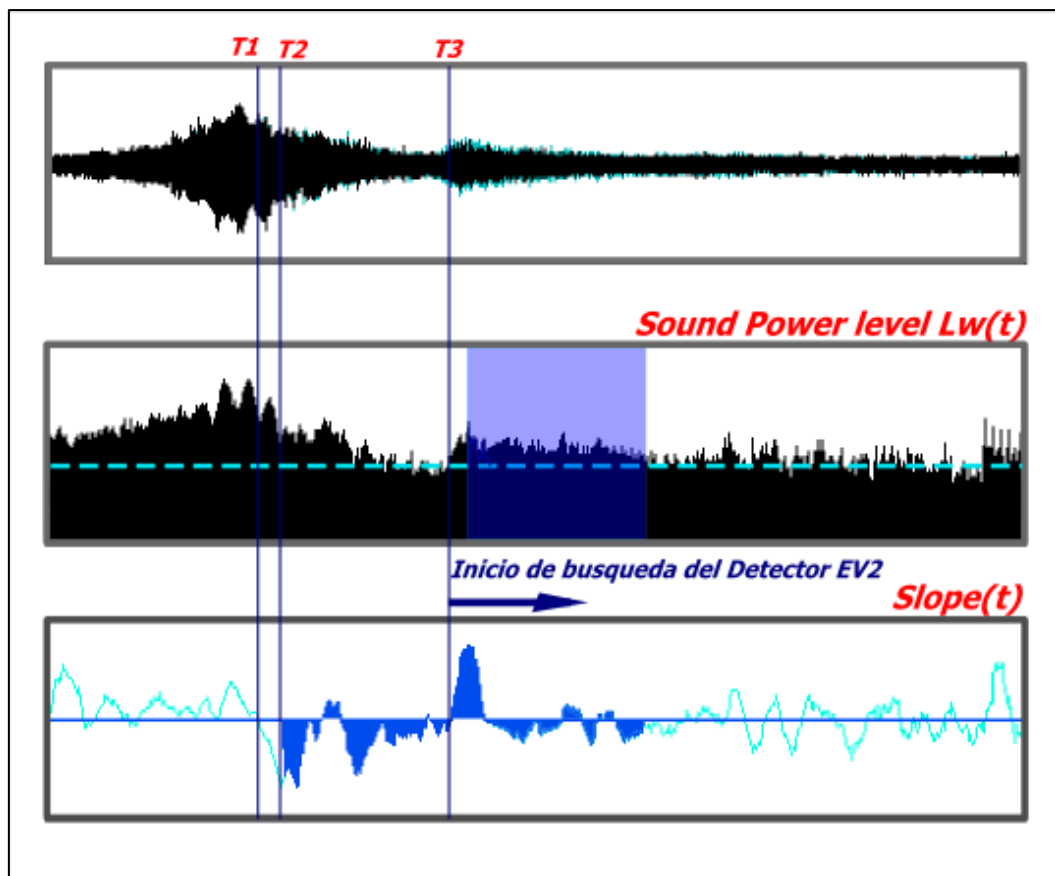


Figura 37 Restricciones aplicadas a la detección de EV2

Se ha descrito la importancia de detectar los instantes **T2** y **T3**, para ello se debe proceder a diseñar un sistema capaz de realizar el **Cálculo de la pendiente "Slope(t)"** de **Lw(t)**, para ello se utiliza una herramienta que devuelve el valor de la pendiente de dos matrices (X,Y), donde "X" sería las muestras de $L_w(t)$ del canal **R**, "Y" sería un array que

se construye del mismo tamaño que “X” y lleva datos del dominio de una función con valores ordenados. Antes de esta acción, se debe adecuar los datos para que la herramienta funcione correctamente, para el calculado de la pendiente y los valores de “X” es necesario tener en cuenta los valores anteriores de la señal y contrastarlos con la muestra actual, para ello se implementa un método de almacenamiento de datos con estructura FIFO mediante un array de elementos que se van agregando a la cola cada vez que se recibe una nueva muestra del sistema de captación, la herramienta toma este array de muestras, los valores de “Y” se obtiene creando una matriz de números consecutivos ya que es el dominio de la función, y así, se calcula la pendiente actual en tiempo real, después de ello se realiza el análisis de esta gráfica y se detecta los instantes T2 y T3 como se explica en la metodología TREND. El tamaño del array se puede modificar en la interfaz de usuario de la aplicación.

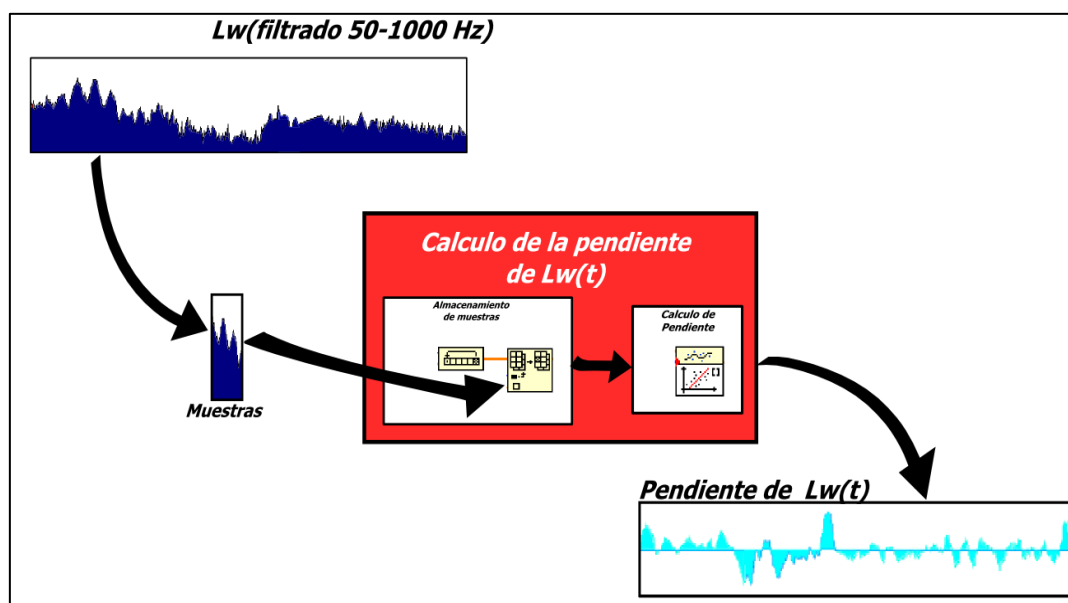


Figura 38 Procesamiento para el cálculo de la pendiente temporal del nivel de potencia sonora

Como especifica la metodología TREND (ver Figura 37), la detección de **T2** se empieza a buscar el descenso temporal directamente en la pendiente calculada después de haber detectado **T1** puesto que habilita la búsqueda del evento EV2, para ello, se aplica un inversor en las muestras que salen del cálculo de la pendiente y después se utiliza un detector de nivel de umbral (figura 39) estimando un tiempo entre 0,5 a 2 segundos

para que se active o detecte **T2**. En el instante **T2** se habilita la búsqueda de **T3**, como se visualiza en la figura 39 también se utiliza un detector de nivel de umbral para los valores de la evolución temporal de la pendiente aplicando un valor de nivel positivo, esperando a que el nivel de potencia acústico se incremente de forma considerable. Con la activación de **T3** se considera que la aeronave ha activado la reversa y consecuente a ello, se da por activado el evento EV2, el cual se envían todos los mensajes de alerta y se registran los datos pertinentes a este evento.

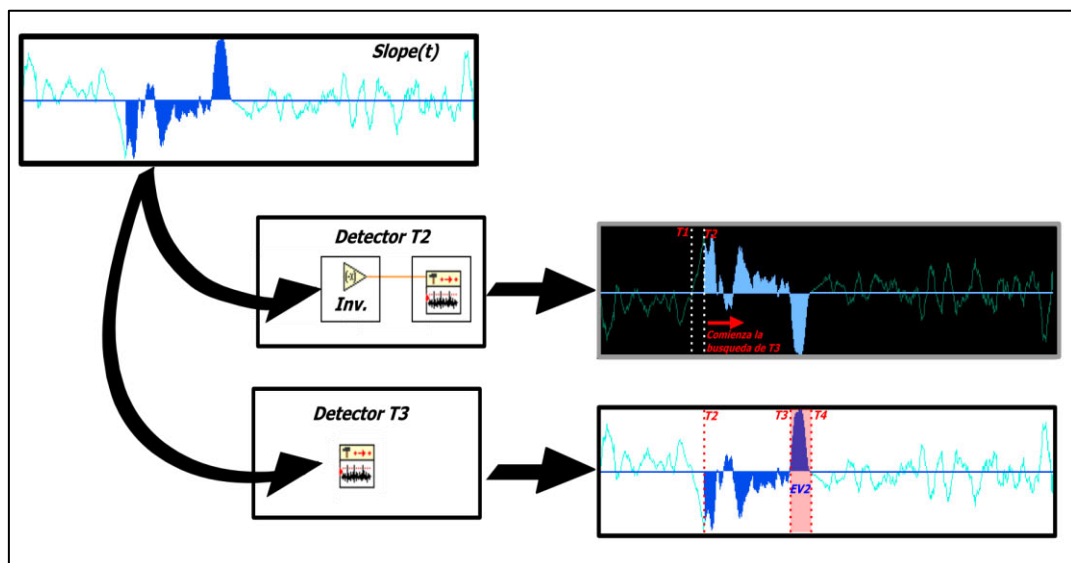


Figura 39 Proceso para la detección de los instantes **T2** y **T3**

Por último, el instante **T4** es la culminación del evento EV2 y es el instante de tiempo en que la estimación de la pendiente del nivel de potencia acústico comienza a descender y su valor de pendiente baja hasta cero, utilizando el mismo detector de umbral de **T3**. (Ver figura 39).

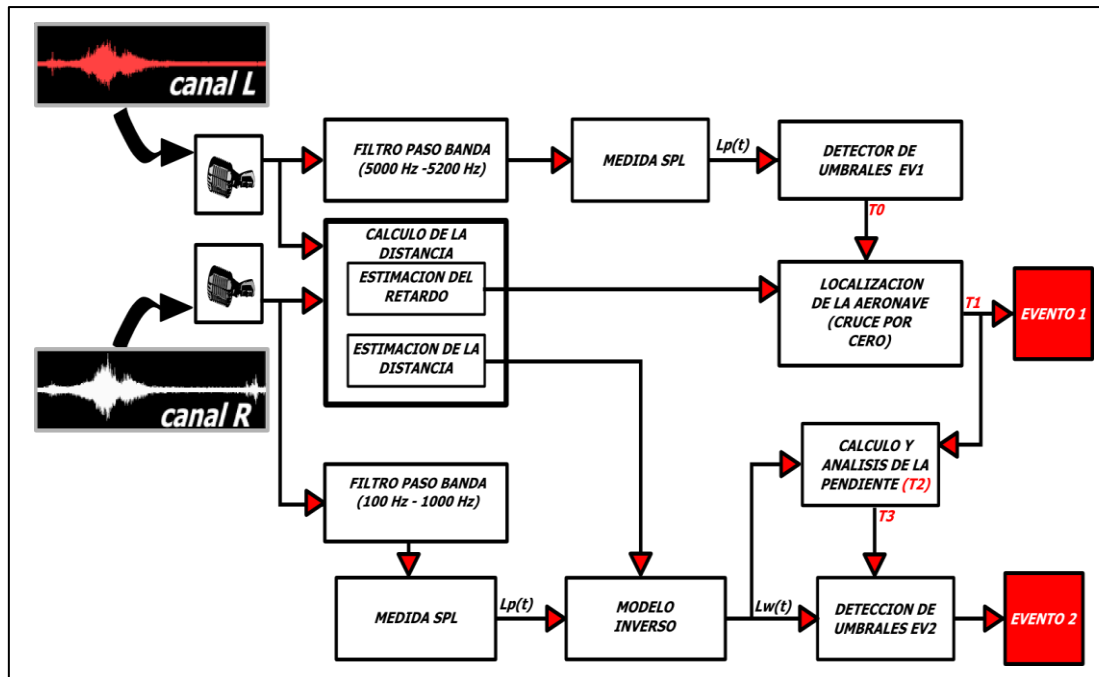


Figura 40 Diagrama de Bloques de la Metodología TREND

La figura 40 representa un diagrama de bloques en el que resume e integra la metodología TREND adaptada a la aplicación. En resumen, Cabe mencionar que el sistema necesita que ocurran cuatro instantes de tiempo importantes antes de activar el evento EV2: T0 que indica cuando se ha producido un evento sonoro considerable ya sea un aterrizaje o despegue, T1 que se activa al clasificar el evento como un aterrizaje, T2 es un tiempo de margen en el que ya se puede empezar a buscar EV2 donde la potencia de la señal sonora empieza a descender y finalmente T3 es el que activa cuando se ha producido el frenado en reversa de la aeronave al aterrizar.

2.3.2.3. REGISTRO Y GRABACIÓN DE EVENTOS

Además de la detección del frenado en reversa, la aplicación debe registrar, grabar y archivar las acciones que ocurren en la pista, esto quiere decir que en el instante en que se detecta un aterrizaje en pista, la aplicación comienza un proceso de grabación con las muestras obtenidas con el sistema de captación.

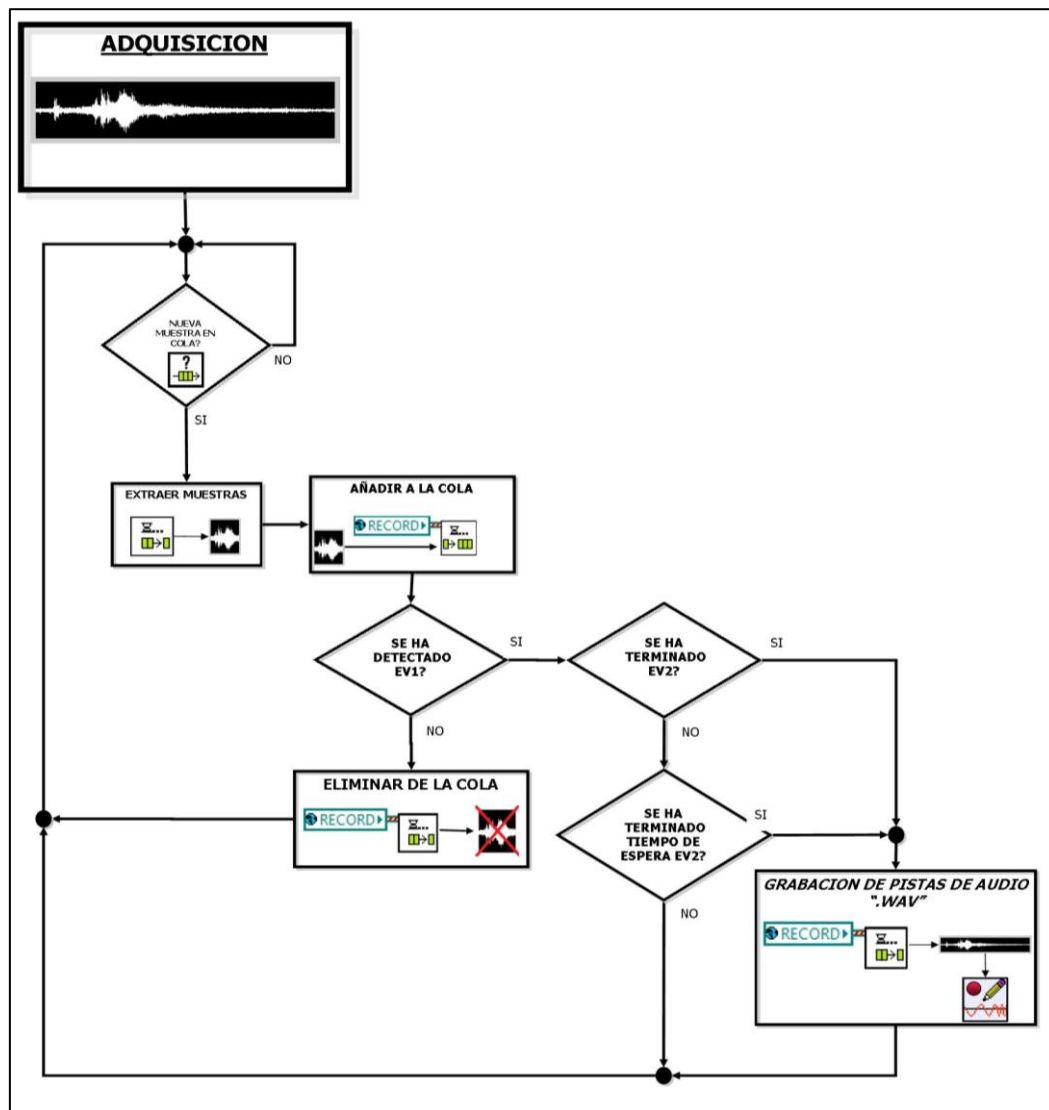


Figura 41 Diagrama de bloques que describe el método de grabación y registro de la aplicación

La figura 41 muestra un diagrama de bloque en el que explica el algoritmo utilizado para realizar el proceso de grabación de los eventos detectados, este proceso se hace

necesario en la aplicación debido a que se quiere tener todos los datos de cada acontecimiento detectado, y así, llevar el control de los eventos que se puedan registrar en la base de datos, en este caso un fichero **“.txt”** y la grabación de audio **“WAV”**.

Al detectarse un aterrizaje, la aplicación debe registrar los eventos que ocurren en tiempo real, para esto se añade una etapa de grabación de audio que consiste almacenar las muestras aplicando un modelo FIFO (**First in, first out**) por medio de colas **“Queue”**, que llegan tal cual como se reciben del módulo de adquisición, pero van eliminando (desencolar **“Dequeue”**) ordenadamente, las muestras que no se requieren en la grabación. En el momento en que se detecte que una muestra sobrepasa el umbral del detector EV1 en el instante **T0** se desactiva la eliminación de muestra y se almacenan todas las muestras adquiridas hasta termine la detección del evento EV2 o que se termine el tiempo de espera para detectar la activación del ruido en reversa (se considera un tiempo estimado entre 20 a 60 segundos dependiendo de la grabación, este tiempo se puede ajustar en el panel de usuario **“Wait EV2”**), se añade una herramienta que construye con todas las muestras que se almacenaron en esta cola un fichero de audio en formato **“.WAV”** (Figura 42), a estos ficheros se les asignan un nombre con fecha de detección de aterrizaje, además, se le añade al nombre (**TR y Without TR**) para realizar una clasificación de ficheros con frenado en reversa y sin frenado en reversa según corresponda.

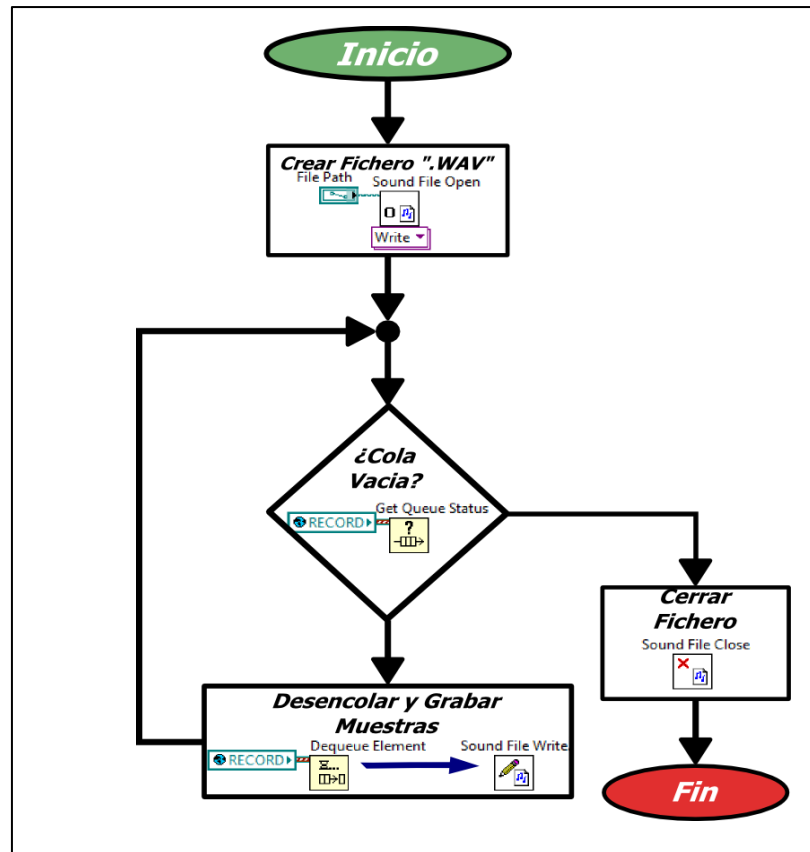


Figura 42 Diagrama de Bloques del módulo de grabación de eventos en pistas de audio

Además de crear el fichero **“.WAV”** con su respectivo nombre, se añade a una tabla de registro, el cual se crea en el momento en que se pone en marcha la aplicación. En esta tabla se encuentran registrados la información de todos los eventos de aterrizajes que se han registrado a lo largo del día y además otros datos del evento como: índice, duración de la detección, detección de EV2, duración de EV2, distancia de activación de EV2, el nombre del fichero entre otros. Esta tabla de registro guarda estos datos en un fichero **“.txt”** que usa como nombre la fecha actual para así poder llevar un reporte de todos los aterrizajes del día en el fichero como si estuviese funcionando en tiempo real. Estos datos se utilizan para comparar los resultados al poner en funcionamiento la aplicación y poder calcular la tasa de error de detección de la misma y se pueden visualizar en la interfaz de usuario.

2.3.3.INTERFAZ DE USUARIO DE LA APLICACIÓN

Después de describir el funcionamiento y desarrollo del sistema TREND en la aplicación, es necesario diseñar la interfaz en LABVIEW en el que el usuario sea capaz de interpretar la información captada por la misma aplicación, visualizando las señales y contrastando los datos registrados en tiempo real, además de configurar los datos de control de la aplicación.

La interfaz es una parte importante en la aplicación ya que el usuario puede interactuar con la misma, debido a los indicadores visuales que posee, además de campos de entrada y salida de datos en los que se podrán cambiar los valores y contrastar diversos resultados. En la parte derecha de la interfaz se han colocado indicadores que muestran cuando se ha detectado tanto EV1 y EV2, y un cuadro de texto en el que llegan mensajes mostrando los datos de cada evento ocurrido en tiempo real (ver figura 43).

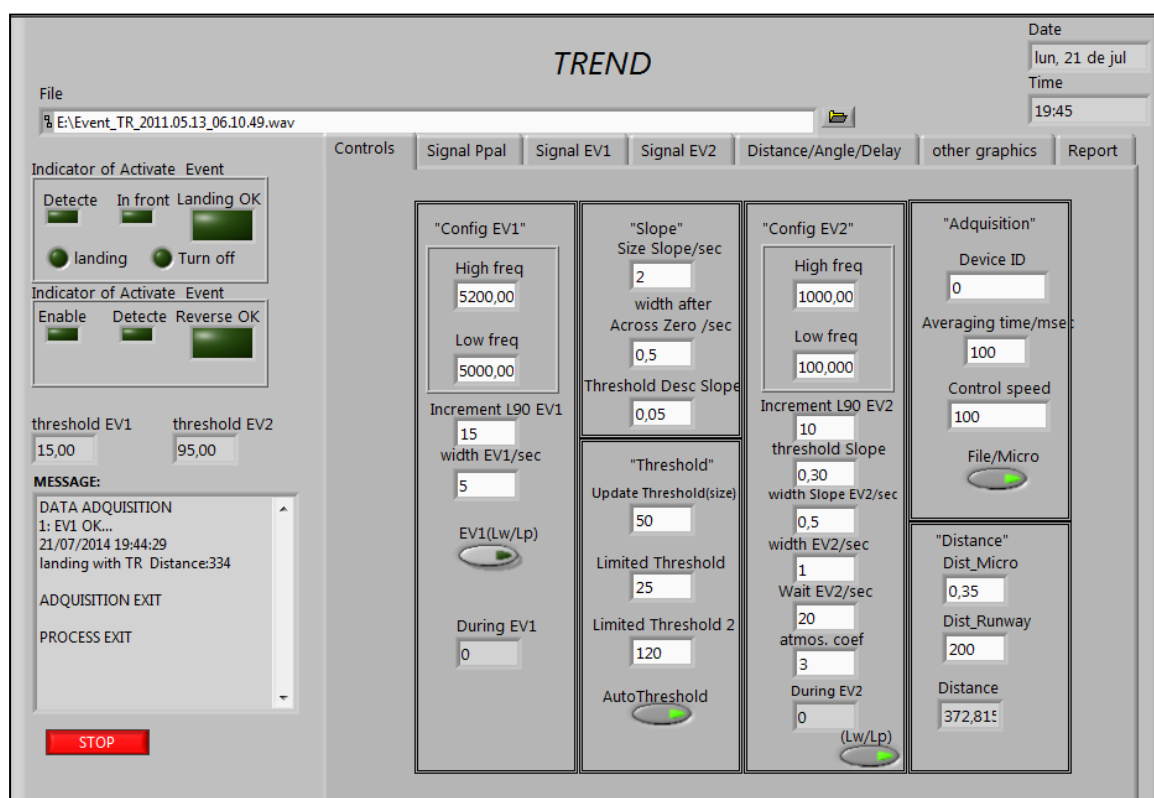


Figura 43 Panel frontal de la interfaz de usuario

Además, posee el lector de ficheros en la parte superior en el que se selecciona el fichero de audio en formato **“.WAV”** para que la aplicación active el procesado de búsqueda de eventos. También integra un conjunto de **“TAB’s”** o pestañas en el que suministra en cada una de ellas varios tipos de información adicional proporcionada por el sistema de adquisición de datos.

La forma en que se visualiza la interfaz de usuario en forma de **“tabs”** (pestañas) o tabuladores le da una mejor organización en el momento de visualizar los datos, debido a que al manejar varias páginas, el usuario, además de los parámetros de entrada de la aplicación, puede observar las señales resultantes de los procesos realizados por la misma aplicación.

La figura 43 muestra unas casillas en las cuales el usuario tiene acceso a los parámetros de entrada principales de la detección en los eventos EV1 y EV2 de la aplicación tales como: parámetros para la detección de evento EV1 (filtro paso banda en **“Hz”**, incremento al percentil L90 en **“dB”**, tiempo de espera en el que se supera el umbral en **“segundos”**), parámetros de configuración para la detección del evento EV2 (parámetros para el cálculo de la pendiente, detección del descenso de la pendiente, incremento al percentil L90 para el umbral automático del detector de EV2 en **“dB”**, umbral para detectar el ascenso de la pendiente **“dB/sec”**, la duración en que debe sobrepasar el umbral de la pendiente en **“segundos”**, coeficiente atmosférico **“dB/Km”** y el tiempo de espera para detectar EV2 después de detectar EV1 en **“segundos”**), también parámetros para el cálculo de la distancia del avión (distancia entre los micrófonos en **“metros”** y distancia del sensor de captación a la pista en **“metros”**) y parámetros para la adquisición de muestras.

En la figura 44 se muestra la imagen de la segunda página del tabulador, donde se puede observar las señales principales del sistema TREND, primero, la señal de adquisición que representa la señal recibida por el módulo de adquisición (aunque no es una forma de onda fiable en comparación con la mostrada en la figura 47, que se usa para mostrar una señal referente a esta forma de onda). La siguiente forma de onda hace referencia a la señal de $L_p(t)$ que se utiliza para la detección del evento EV1 y se resalta el momento en el que la señal activa el evento EV1 referenciado sobre el umbral del evento EV1. La

siguiente señal describe la forma de onda dibujada por $Lw(t)$ para detectar el evento EV2 y resalta el instante en que se activa el evento EV2. Por último, en la parte inferior de la imagen se observa la forma de onda que corresponde a los valores de la distancia en los instantes en los que la aeronave se acerca al array de micrófonos y resalta en diferentes colores en el instante en que la aeronave activa el evento EV1 y si ocurre, señala cuando se activa el evento EV2.

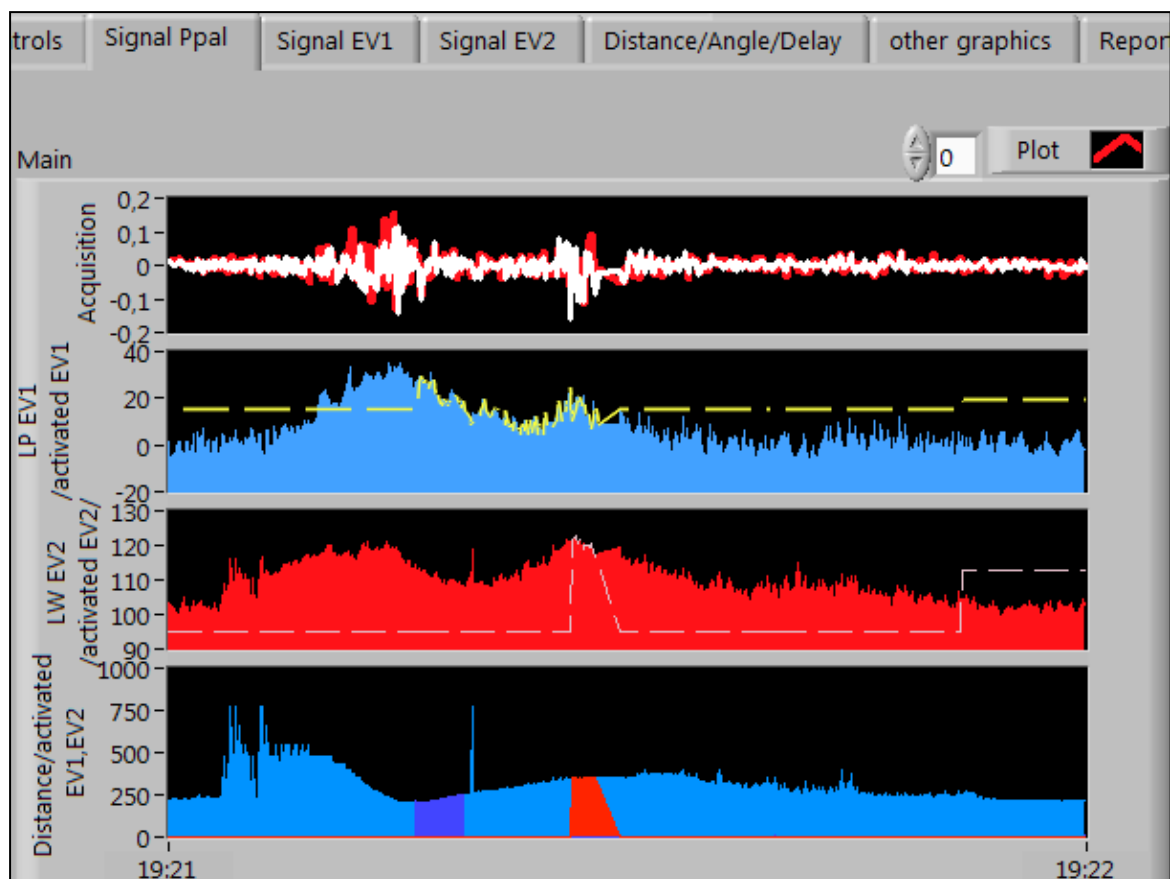


Figura 44 Imagen de las señales principales en la detección de los eventos

En la siguiente página del tabulador se muestran las señales referentes al evento **EV1**. La figura 45 es una imagen en la que se puede observar 4 señales, la primera corresponde a la forma de onda de la señal " $Lp_{(5000-5200\text{ Hz})}(t)$ ", resaltando los momentos en que esta señal sobrepasa el umbral de detección y el instante en que el detector de umbral se ha activado (**T0**), la segunda señal muestra el retardo que existe entre los dos micrófonos "**delay**" resaltando sobre la forma de onda el instante en que el aterrizaje "**Landing**" es detectado (**T1**) hasta la finalización de todo el evento (hasta que el tiempo de espera del

evento EV2 termine o si se activa EV2 hasta **T4**), la tercera señal se refiere a la localización del avión o distancia con respecto al sensor de captación en tiempo real, en esta forma de onda cambia de color el momento en el que la aeronave pasa al frente del sensor de captación (T1). La última forma de onda indica el momento en que el evento EV1 se activa en el aterrizaje en **"T1"** hasta que se termina la búsqueda del evento EV2 sobre la señal de nivel de presión sonora para la búsqueda de EV1.

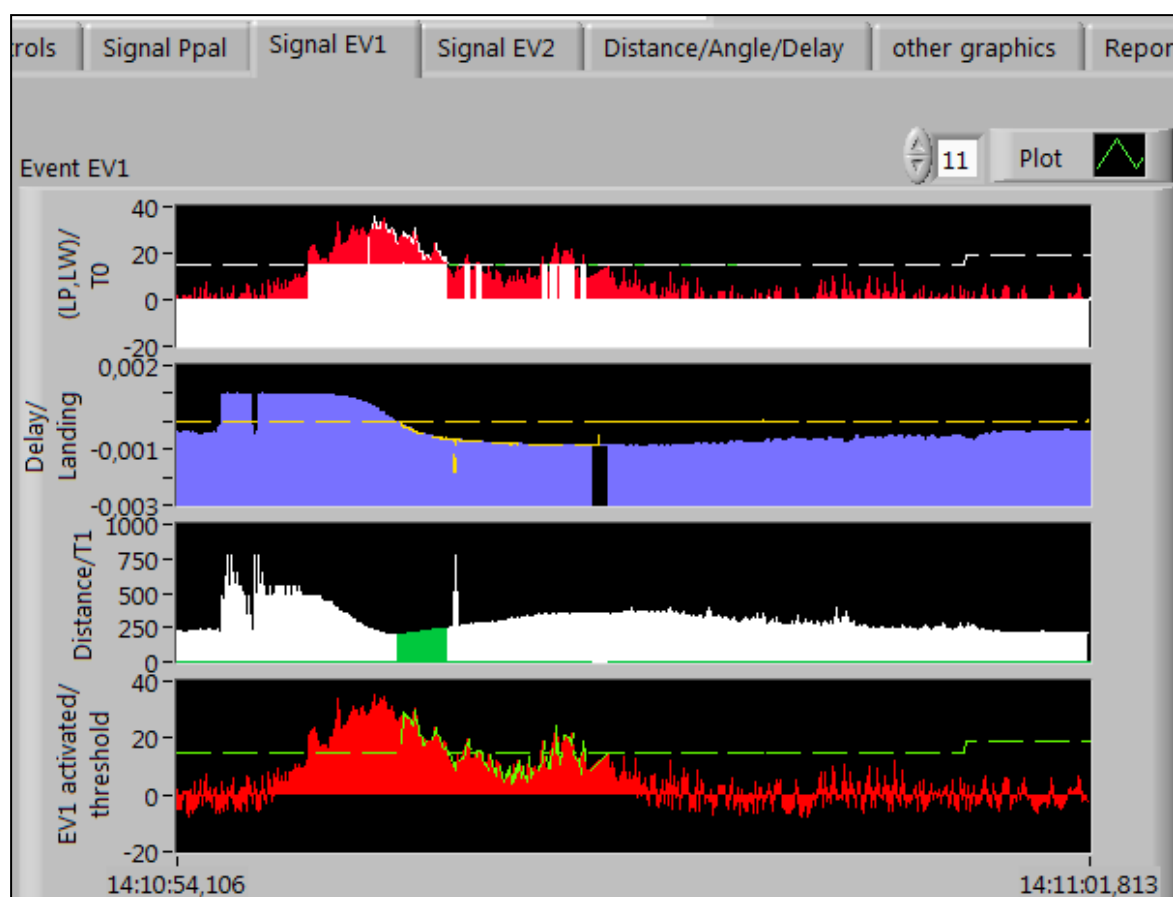


Figura 45 Imagen de las formas de onda que interfieren en la detección de EV1

En la siguiente imagen (figura 46) se observan las señales implicadas en la detección del evento EV2, la primera forma de onda consta del nivel de potencia acústica calculada de la señal filtrada de 100 a 1000 Hz, indicando el umbral de detección los instantes en que se activa EV2 en el instante **(T3)** después de detectar EV1 y el instante **(T2)**, además. La segunda forma de onda representa la distancia en el cual se visualiza el instante (T1). La tercera muestra el nivel de presión sonora para poder compararla con la estimación del nivel de potencia acústica y las demás señales, además se observa que resalta el instante

(T3) y se puede visualizar (T4) cuando finaliza la detección. La última forma de onda dibuja la gráfica de la pendiente calculada por la evolución temporal del nivel de potencia sonora $LW_{(100-1000\text{ Hz})}(t)$, y se marca el instante en (T2).



Figura 46 Imagen de las formas de onda que interfieren en la detección de EV2

En la gráfica de la figura 47 se visualiza la página del tabulador donde se observa la señal acústica que se recibe del módulo de adquisición, después de esta se muestra las señales que se utilizan para calcular la evolución temporal de la distancia, estas formas de ondas son: la señal representando la distancia con unidades en “metros”, la evolución temporal del ángulo “ ϕ ” indicando la dirección de llegada del sonido al sistema de captación, la evolución del retardo del sonido entre los dos micrófonos (Delay).

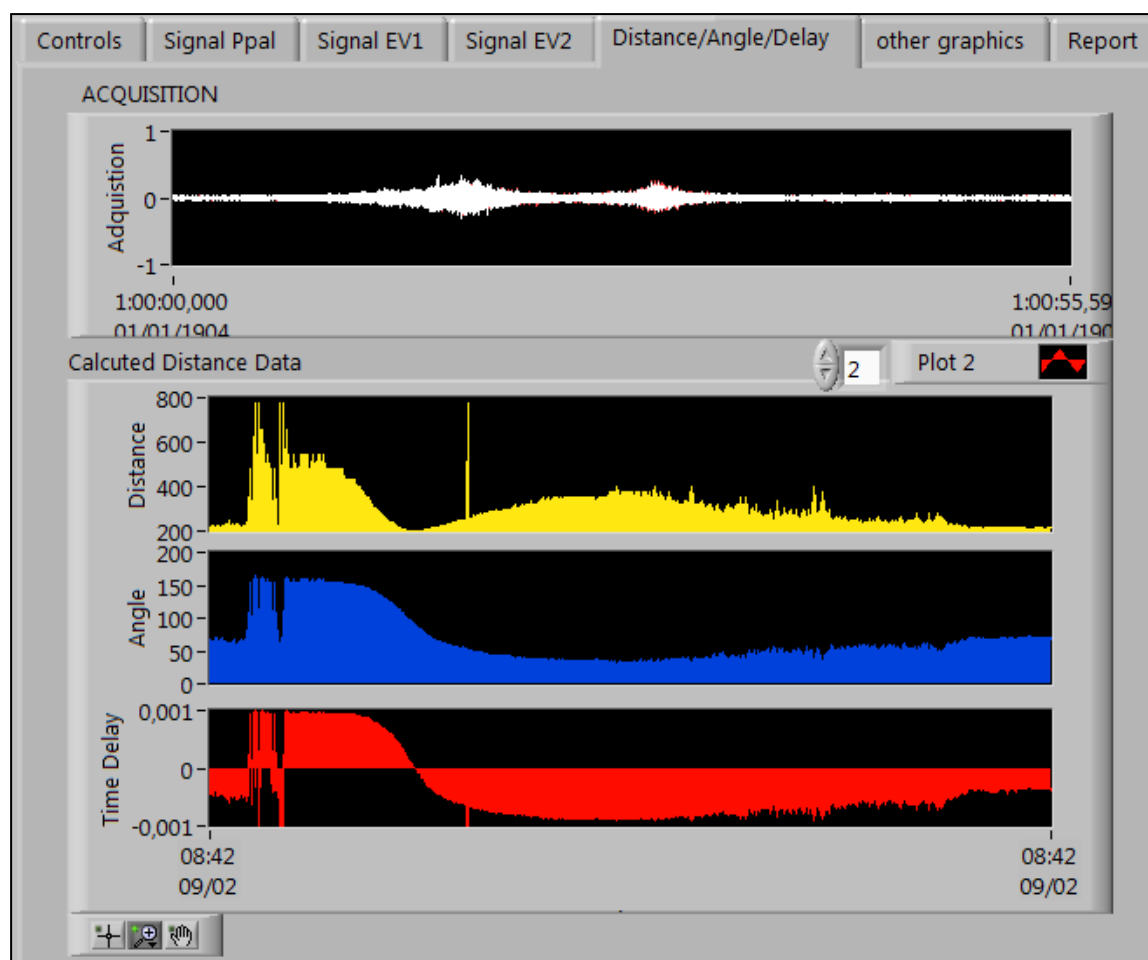


Figura 47 Imagen de la evolución temporal de la distancia del avión al sensor

Por último, la interfaz posee una pagina para examinar el informe de las actividades que se generan durante el día en la pista, consiste en una tabla en la que se registra cada aterrizaje que ocurre en la pista como se muestra en la figura 48.

Esta tabla realiza el reporte del día clasificándolos entre aterrizajes sin reversa y con reversa, además, registra la hora y fecha del aterrizaje, la activación del evento, la duración que ha tenido cada evento en la pista como el tiempo que ha estado activado el empuje en reversa durante el aterrizaje y el nombre del archivo “.WAV” que se ha grabado del evento, como se ha descrito en el capítulo anterior, cada vez que ocurre un aterrizaje, se graba un archivo de audio para poder revisarlo posteriormente si lo desea el usuario. En esta tabla se puede visualizar con mayor certeza los falsos positivos al momento de evaluar errores en la detección de los eventos en la aplicación del sistema TREND.

[illegible]

Figura 48 Imagen de reporte de los aterrizajes

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez realizada la descripción la metodología aplicada para la detección de los sucesos en pista (clasificación y detección de los eventos EV1 y EV2), el desarrollo y descripción funcional de la aplicación con la interfaz de usuario en LABVIEW, descrito en los apartados anteriores, se realiza la comprobación de la aplicación. Para ello, se utilizan 252 ficheros de despegues en la pista, 315 ficheros de aterrizajes con reversa y 83 de aterrizajes sin reversa. Estos ficheros son grabaciones de audio que registran la actividad de la pista del aeropuerto descritas en el apartado 2.1 suficientes para evaluar y comparar la tasa de error que proporciona la aplicación en la detección de los eventos.

Para realizar pruebas del funcionamiento en la aplicación y comprobar la detección de los eventos, se utilizaron los parámetros apuntados en la “**Tabla 2**” que se muestra a continuación:

Tabla 2 Parámetros para la configuración de los detectores en la aplicación

<i>Evento</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Explicación</i>	<i>Valores utilizados</i>
Evento EV1	1. Incremento para la determinación del umbral automático de nivel aplicado al detector EV1	El incremento es añadido al nivel (L90) para determinar el umbral que se aplica a la evolución temporal de $L_p(t)$ de la señal filtrada para buscar el evento 1	15(dB)
	2. Duración de EV1	Tiempo durante el cual $L_p(t)$ debe exceder el umbral para realizar la detección	5(s)

Evento EV2	3. Incremento para la determinación del umbral automático de nivel aplicado al detector EV2	El incremento es añadido al nivel (L_{90}) para determinar el umbral que se aplica a la evolución temporal de $L_w(t)$ de la señal filtrada para buscar el evento 2	10 (dB)
	4. Duración para la detección del EV2	Tiempo durante el cual $L_w(t)$ debe exceder el umbral para realizar la detección	1(s)
	5. Umbral de pendiente negativa	Umbral que se aplica a la pendiente del nivel de potencia sonora para determinar el instante T2	0.05 (dB/s)
	6. Duración de la pendiente negativa	Tiempo durante el cual la pendiente debe exceder el umbral de pendiente para la determinación de T2	0.5 (s)
	7. Umbral de pendiente	Umbral que se aplica a la pendiente del $L_w(t)$ para determinar el instante T3	0.1 (s)
	8. Duración del umbral de la pendiente	Es la duración en unidades de tiempo el cual el valor de la pendiente sobre pasa el umbral para determinar el instante T3 en que se activa el evento 2	1(s)

La figura 49 es una imagen frontal de la interfaz de usuario en el que resaltan las casillas don se deben introducir los parámetro mencionados en la tabla 2 para realiza las comprobaciones de funcionamiento de la aplicación software.

The screenshot shows a control interface with four main panels:

- "Config EV1"**: Contains input fields for "High freq" (5200,00), "Low freq" (5000,00), "Increment L90 EV1" (15), "width EV1/sec" (5), a slider for "EV1(Lw/Lp)", and a field for "During EV1" (0).
- "Slope"**: Contains input fields for "Size Slope/sec" (2), "width after" (0,5), "Across Zero /sec" (0,5), "Threshold Desc Slope" (0,05), "Update Threshold(size)" (50), "Limited Threshold" (25), "Limited Threshold 2" (120), and a slider for "AutoThreshold".
- "Config EV2"**: Contains input fields for "High freq" (1000,00), "Low freq" (100,000), "Increment L90 EV2" (10), "threshold Slope" (0,30), "width Slope EV2/sec" (0,5), "width EV2/sec" (1), "Wait EV2/sec" (20), "atmos. coef" (3), "During EV2" (0), and a slider for "(Lw/Lp)".
- "Adquisition"**: Contains input fields for "Device ID" (0), "Averaging time/msec" (100), "Control speed" (100), a "File/Micro" button, and a "Distance" section with fields for "Dist_Micro" (0,35), "Dist_Runway" (200), and "Distance" (372,81).

Numbered highlights in the image:

- Increment L90 EV1 (15)
- width EV1/sec (5)
- Increment L90 EV2 (10)
- width EV2/sec (1)
- Threshold Desc Slope (0,05)
- Across Zero /sec (0,5)
- threshold Slope (0,30)
- width Slope EV2/sec (0,5)

Figura 49 Indicador de parámetros en la interfaz de control para la configuración de la aplicación

Respecto al análisis del rendimiento de la aplicación para realizar la comprobación de funcionamiento, se debe tener en cuenta que:

- El etiquetado de las grabaciones se han tenido que realizar manualmente debido a que las autoridades aeroportuarias no disponen de información referente a la utilización de la reversa.
- Aunque las grabaciones se hayan realizado en una locación óptima, existen muchos eventos acústicos de reversa que son muy complicados de detectar de forma manual, debido a que algunas señales poseen un efecto de ruido de fondo que a su vez afecta en el cálculo de la distancia.
- En cuanto a la separación entre los micrófonos del sistema de detección, no existe la certeza en que todas las grabaciones se hayan realizado con la misma distancia debido a que en el momento de la grabación no se tuvo en cuenta registrar ese valor en

la etiqueta de cada fichero. Este parámetro puede variar de una a otra grabación entre 28 y 35 cm. Para las pruebas realizadas a la aplicación se ha supuesto un valor fijo de **35 cm** de separación para el cálculo de la distancia.

En las pruebas realizadas se ha utilizado los umbrales automáticos para la detección de los dos eventos, en las cuales el umbral de detección se adapta en función del ruido de fondo. Debido a que este valor de nivel se actualiza cada 50 segundos en tiempo real, es necesario repetir las dos o varias veces con la misma grabación con el fin de que el valor del umbral se actualice con los datos proporcionados por el fichero de audio que realiza la prueba actual.

La primera comprobación del funcionamiento de la aplicación que se realiza es la búsqueda de ese primer evento y clasificar si el ruido detectado es producido por un aterrizaje o por un despegue.

Tabla 3 Resultados de la clasificación del Evento 1

Tipo de ficheros	Número de ficheros	EV1 detectados	EV1 no detectados	Error (%)
Aterrizajes	401	398	3	1 %
Despegues	252	16	236	6 %

Cabe aclarar que de los ficheros de audio con etiqueta “Takeoff” (Despegue), el 45% de los ficheros no fueron detectados por la aplicación por varias opciones: porque no sobrepasan el umbral o porque el instante en que se supera el valor de umbral no se detecta el cruce por cero. En tal caso, se toma como si el evento 1 no se hubiese detectado sin afectar la tasa de error.

El siguiente paso es comprobar la detección del evento 2 en la aplicación. Para ello, se emplean las otras grabaciones en las que se detectó el evento 1 (398 ficheros de audio). En la tabla 4 se muestra los resultados de esta clasificación.

Tabla 4 Resultados de la fase de detección de EV2

Tasas de detección	EV2s detectados	EV2s no detectados	Error %
Aterrizajes con reversa (315)	287	28	9 %
Aterrizajes sin reversa (83)	15	68	18 %

CONCLUSIONES

Como conclusión más importante en trabajo realizado, está en el funcionamiento de la aplicación software, debido a que es capaz de leer un fichero de audio en formato “.WAV” y realizar un procesamiento para determinar si este corresponde a un aterrizaje de un avión y si en él se ha producido la reversa.

Además se ha podido constatar que:

- a) Con la metodología TREND implementado en la aplicación, se obtuvieron mejores resultados (tasas de error más bajas) en la detección de eventos sonoros que un sistema convencional que sólo utiliza detectores de umbrales.
- b) implementando el modelo software en que el sistema de captación se adquisición se construye de forma independiente al sistema de detección y procesado, se consigue tener flexibilidad al momento de realizar búsqueda de errores en la aplicación y modificaciones futuras.
- c) Con las herramientas de LABVIEW para controlar la tarjeta de sonido (Soundblaster), se diseñaron algunos sistemas de pruebas como captación de sonido, reproductores de ficheros, grabadores de señales de audio en ficheros “.WAV”, con estas pruebas de entrenamiento se obtuvieron las herramientas software que ayudaron a construir el modulo de adquisición para la aplicación.
- d) Los filtros paso banda implementados en la aplicación lograron discriminar y eliminar el ruido de fondo producido por el entorno aeroportuario para el acondicionamiento de las señales implicadas en la detección del evento 1 y evento 2.
- e) En el evento 1, además del detector de umbrales se utilizó un sistema de detección de procedencia de ruido. Este detector se construyó con un detector de cruce por cero, el cual evalúa la estimación temporal de la seña de correlación cruzada, de esta forma se logró discriminar el ruido producido por los despegues.
- f) Mediante el análisis de la evolución temporal de la pendiente que caracteriza la estimación del nivel de potencia acústica, implementado en la aplicación software del proyecto, se pudo conseguir que el evento 2 se detecte de una manera más eficiente, disminuyendo los falsos positivos.

- g) Para calcular la estimación del nivel de potencia acústica se implementó un sistema que calcula la evolución temporal de la distancia de la fuente de ruido mediante la aplicación del modelo de propagación inverso.
- h) La aplicación se implementó un sistema de grabación que se activa en el momento en que el módulo de procesamiento detecte una señal por encima de umbral, y registra todas las muestras sonoras que interfieren los eventos detectados, creando un fichero en formato **“WAV”**, y se almacenan en una carpeta específica.
- i) Para el reporte de eventos en la aplicación, se creó un fichero de texto, el cual se registran los datos de cada aterrizaje detectado por la aplicación y se visualiza en una tabla de la interfaz de control de usuario.

Recomendaciones para obtener mejores tasas de error en la aplicación:

- Al observar la evolución temporal del cálculo de la distancia en la aplicación, se analizó que el ruido de fondo introduce algunos valores indeseados, generando errores en el cálculo de la correlación cruzada y a la vez, el resultado del valor de la distancia es afectado. Es posible ajustar estos valores implementando un filtrado en la señal temporal de la correlación cruzada (retardo).
- Se debe tener en cuenta que el valor de los umbrales automáticos no son constantes, en consecuencia, variará el valor de una prueba a otra, modificando el valor de la duración, aunque se realice la prueba con el mismo fichero. Si se trabaja en tiempo real con el sistema de captación integrado a la aplicación, este inconveniente es irrelevante.
- Otro valor que no se ha precisado es la longitud de separación entre los dos micrófonos al momento de realizar las grabaciones de los ficheros **“.WAV”**. A raíz de esto, la aplicación puede registrar una tasa de error más alta.

Mejoras en el software de la aplicación:

- Una modificación opcional a la aplicación es la adaptación del módulo de adquisición para que reciba la señal de dos micrófonos, conectando una segunda tarjeta de sonido. En cuyo caso, simula el sistema de captación descrito en el proyecto.

- Desarrollar un sistema para visualizar de una forma sencilla y ordenada, los datos adquiridos de los aterrizajes desde la interfaz de usuario mediante un menú de control, así se podría revisar información captada en días anteriores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. Ayuntamiento de Madrid. *La Contaminación Acústica*. , 2012 Available from:<http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/opencms/calair/contAcustica/portadilla.html>.
- [2]. Ayuntamiento de Madrid. *Efectos De La Contaminación Acústica*. , 2012 Available from:<http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/opencms/calair/contAcustica/efectos.html>.
- [3]. A. GONZÁLES GARCIA. *LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA Y SUS CONSECUENCIAS EN LA SALUD*. Available from:<http://www.onsalus.com/la-contaminacion-acustica-y-sus-consecuencias-en-la-salud/75/articulo>.
- [4]. GUTIÉRREZ, J. Transport Geography in Spain. *Journal of Transport Geography*, 2013, vol. 28, no. Complete. pp. 216-218.
- [5]. J. PINEDO. *Apuntes Jurídicos Sobre El Ruido En Los Aeropuertos*. , 2001 Available from:<http://noticias.juridicas.com/articulos/30-Derecho-Medioambiental/200101-255780101170.html>.
- [6]. MINISTERIO DE FOMENTO. *Circular Aeronáutica 2/2006, De 26 De Julio, De La Dirección General De Aviación Civil, Por La Que Se Establecen Procedimientos De Disciplina De Tráfico Aéreo En Materia De Ruido En El Aeropuerto De Madrid-Barajas*. 5/12/2014 6:03:17 AM Zona horaria local (GMT - 4hr) Available from:http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/c2-2006-dgac.html.
- [7]. KENOBI-LJN. *La Reversa Del Motor De Un Avión*. , 2009 Available from:<http://www.enocasioneshagoclick.com/2009/08/la-reversa-de-un-motor-de-avion.html>.
- [8]. ASENSIO RIVERA, C. *Aportación a Los Sistemas De Discriminación De Fuentes Sonoras En La Medida Del Ruido En Aeropuertos*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales - Universidad Politécnica de Madrid, 2012.
- [9]. *ISO 1996-1:2003*. Available from:<https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:1996:-1:ed-2:v1:en:sec:3.1.1>.
- [10]. NATIONAL INSTRUMENTS, N. *LabVIEW™ Basics I Introduction Course Manual*, 05/2006 Available from: ni.com.
- [11]. NATIONAL INSTRUMENTS, N. *LabVIEW Basics II Development Course Manual*. , 05/2006.
- [12]. VALIN, J., MICHAUD, F., ROUAT, J. and LÉTOURNEAU, D. *Robust Sound Source Localization using a Microphone Array on a Mobile Robot*. IEEE, 2003.